

Títol: Simulador d'allaus

Volum: 1

Alumne: Santiago Rodríguez Fontoba

Director: Pau Fonseca i Casas

Departament: EIO

Data: 22 de Setembre de 2006

DADES DEL PROJECTE

Títol del Projecte: Simulador d'allaus

Nom de l'estudiant: Santiago Rodríguez Fontoba

Titulació : Enginyeria Informàtica

Crèdits: 30

Director/Ponent: Pau Fonseca i Casas

Departament: EIO

MEMBRES DEL TRIBUNAL (*nom i firma*)

President:

Vocal:

Secretari:

QUALIFICACIÓ

Qualificació numèrica:

Qualificació descriptiva:

Data:

SIMULADOR D'ALLAUS

PROJECTE FINAL DE CARRERA
ENGINYERIA EN INFORMÀTICA SUPERIOR

ALUMNE:

SANTI RODRÍGUEZ FONTOBA

DIRECTOR:

PAU FONSECA I CASAS

FACULTAT D'INFORMÀTICA DE BARCELONA
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

JULIOL 2006

AGRAÏMENTS

Aquest treball és el punt final a una etapa de la meua vida. Set anys han passat des de que la vaig iniciar i no hauria estat possible finalitzar-la amb èxit sense l'ajuda de moltes persones. Per aquest motiu els meus agraïments van dirigits...

primer de tot, als meus pares, avis i familiars per haver cuidat de mi i pel suport que he rebut d'ells durant tota la carrera. A la meua novia Alexandra, per entendre que treballar i fer un projecte final de carrera no deixa gaire temps lliure, així mateix pel seu suport i ajuda en la realització d'aquest. Als amics i companys de la facultat Josep, Jorge, Joan, Arnau, Enric, Pau, Toni, Laura, Sergi, Oriol, i en especial a en Rubén "Gopher major", amb el qual he compartit moltes hores de treball en els nostres respectius PFCs, i a en Lluís, pels seus consells. Al director d'aquest projecte, en Pau Fonseca, per tot el que m'ha ensenyat, tant en l'etapa de docència com en la realització d'aquest treball, i per haver-me guiat per a que aquest projecte hagi arribat a ser una realitat. Per finalitzar, als meus caps de feina Oriol i Santi, per haver-me donat la possibilitat de combinar treball i estudis de la millor manera, així com a la resta d'integrants d'OS Sistemes.

ÍNDIX

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓ | 15 |
| 1.1. Presentació | 15 |
| 1.2. Motivació | 15 |
| 1.3. Problemàtica..... | 16 |
| 1.4. Objectius | 16 |
| 2. MARC TEÒRIC..... | 19 |
| 2.1. Moviments de vessant | 19 |
| 2.1.1. Introducció..... | 19 |
| 2.1.2. Classificació bàsica | 19 |
| 2.2. Allaus..... | 23 |
| 2.2.1. Definicions | 23 |
| 2.2.2. Factors que intervenen en el fenomen | 23 |
| 2.2.3. Classificació bàsica | 24 |
| 2.2.4. Nivells d'una allau | 25 |
| 2.2.5. El mantell nival | 27 |
| 2.2.6. Escala europea de perill d'allaus | 28 |
| 2.3. Dinàmica d'allaus..... | 29 |
| 2.3.1. Força impulsora i forces de resistència | 29 |
| 2.3.2. Forces de resistència i tipus de neu | 31 |
| 2.3.3. Impacte de les allaus | 33 |
| 2.4. Sistemes d'informació Geogràfica | 34 |
| 2.4.1. Introducció..... | 34 |
| 2.4.2. Construcció de bases de dades geogràfiques..... | 35 |
| 2.4.3. Model raster..... | 36 |
| 2.4.4. Model vectorial | 37 |
| 2.4.5. Raster VS vectorial..... | 37 |
| 2.4.6. Fitxers SIG..... | 38 |
| 2.5. Autòmats cel·lulars..... | 41 |
| 2.5.1. Introducció..... | 41 |
| 2.5.2. Història..... | 42 |
| 2.5.3. Definicions | 43 |
| 2.5.4. Exemples i aplicacions | 48 |
| 2.5.5. Un model de referència: Na-Sch..... | 51 |
| 3. MODELATGE | 55 |
| 3.1. Descripció del model AC d'allaus de placa | 55 |
| 3.1.1. Components | 55 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 3.1.2. | Consideracions sobre les allaus de placa..... | 55 |
| 3.1.3. | Conceptes bàsics | 56 |
| 3.1.4. | Estats..... | 56 |
| 3.1.5. | Veïnatge | 57 |
| 3.1.6. | Condicions de frontera..... | 57 |
| 3.1.7. | Configuració inicial | 58 |
| 3.1.8. | Capes de dades | 58 |
| 3.1.9. | Regles d'evolució..... | 61 |
| 3.1.10. | Funcions de càlcul..... | 64 |
| 3.2. | Especificació de l'AC | 69 |
| 3.2.1. | Sistema | 70 |
| 3.2.2. | Blocs..... | 73 |
| 3.2.3. | Comunicació..... | 74 |
| 3.2.4. | Diagrama d'estats | 75 |
| 3.2.5. | Processos: estat Estàtic | 77 |
| 3.2.6. | Processos: estat Buit..... | 78 |
| 3.2.7. | Processos: estat Dinàmic..... | 78 |
| 3.2.8. | Procediments..... | 80 |
| 4. | ANÀLISI..... | 83 |
| 4.1. | Anàlisi de requeriments..... | 83 |
| 4.1.1. | Requisits funcionals..... | 83 |
| 4.1.2. | Requisits no funcionals | 84 |
| 4.2. | Arquitectura del sistema | 85 |
| 4.3. | Procés d'enginyeria | 86 |
| 4.4. | Llenguatge de programació | 87 |
| 4.4.1. | Elecció del llenguatge de programació..... | 87 |
| 4.4.2. | Entorn de desenvolupament..... | 88 |
| 4.4.3. | Llibreria GUI | 89 |
| 4.5. | Representació SIG..... | 89 |
| 4.6. | Realitat Virtual..... | 89 |
| 5. | ESPECIFICACIÓ | 95 |
| 5.1. | Casos d'ús | 95 |
| 5.1.1. | Diagrama de casos d'ús | 95 |
| 5.1.2. | Especificació dels casos d'ús | 96 |
| 5.2. | Patró arquitectònic | 101 |
| 5.3. | Comportament del sistema..... | 102 |
| 5.4. | Model conceptual | 108 |
| 6. | DISSENY I IMPLEMENTACIÓ | 117 |
| 6.1. | Procés..... | 117 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 6.2. | Creació de l'escenari | 118 |
| 6.3. | Inserció de capes d'obstacles..... | 120 |
| 6.4. | Desencadenament de l'allau..... | 121 |
| 6.5. | Simulació | 122 |
| 6.5.1. | Fase de propagació | 122 |
| 6.5.2. | Fase de lliscament..... | 123 |
| 6.6. | Consulta d'una cel·la..... | 131 |
| 6.7. | Estadístiques | 131 |
| 6.7.1. | Definicions | 131 |
| 6.7.2. | Càlcul..... | 132 |
| 6.8. | Disseny de l'interfície d'usuari..... | 135 |
| 6.8.1. | Finestra de l'aplicació..... | 135 |
| 6.8.2. | Diàleg 'Carregar escenari' | 136 |
| 6.8.3. | Diàleg 'Carregar obstacles' | 137 |
| 6.8.4. | Diàleg 'Punts de trencament' | 137 |
| 6.8.5. | Diàleg 'Informació de cel·la' | 138 |
| 6.8.6. | Diàleg 'Estadístiques' | 139 |
| 6.9. | Representació de l'escenari..... | 140 |
| 7. | EXPERIMENTACIÓ | 145 |
| 7.1. | Validació del funcionament | 145 |
| 7.1.1. | Objectiu de les proves | 145 |
| 7.1.2. | Descripció de l'escenari de proves | 145 |
| 7.1.3. | Valors tipus..... | 146 |
| 7.1.4. | Descripció d'un cas real | 146 |
| 7.1.5. | Taula d'iteracions..... | 147 |
| 7.1.6. | Simulació 1..... | 148 |
| 7.1.7. | Simulació 2..... | 151 |
| 7.1.8. | Simulació 3..... | 154 |
| 7.1.9. | Simulació 4..... | 156 |
| 7.1.10. | Simulació 5..... | 159 |
| 7.1.11. | Comparació dels resultats amb dades reals | 161 |
| 7.2. | Proves de rendiment | 162 |
| 8. | PLANIFICACIÓ..... | 167 |
| 8.1. | Planificació i dedicació..... | 167 |
| 8.1.1. | Planificació inicial | 167 |
| 8.1.2. | Dedicació final..... | 168 |
| 8.2. | Anàlisi del cost..... | 169 |
| 8.2.1. | Rols | 169 |
| 8.2.2. | Cost en recursos humans..... | 169 |
| 8.2.3. | Cost de material i serveis..... | 170 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 8.2.4. | Cost final..... | 171 |
| 8.2.5. | Implantació..... | 171 |
| 9. | CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR..... | 173 |
| 9.1. | Conclusions | 173 |
| 9.1.1. | Sobre el model de simulació..... | 173 |
| 9.1.2. | Sobre el simulador..... | 173 |
| 9.2. | Vies de continuïtat | 174 |
| 9.2.1. | Respecte al model d'allaus de placa..... | 174 |
| 9.2.2. | Respecte al modelatge d'altres tipus d'allau..... | 175 |
| 9.2.3. | Respecte a les funcionalitats del simulador | 175 |
| 9.2.4. | Respecte a la interfície gràfica..... | 176 |
| 10. | ÍNDEXS I REFERÈNCIES | 179 |
| 10.1. | Índex de figures | 179 |
| 10.2. | Índex de taules | 181 |
| 10.3. | Índex d'expressions..... | 182 |
| 10.4. | Referències..... | 184 |
| 10.4.1. | Bibliografia..... | 184 |
| 10.4.2. | Webgrafia..... | 185 |
| | MANUAL D'USUARI..... | 187 |

ESTRUCTURA DEL DOCUMENT

Aquesta memòria està organitzada en deu capítols i un annex que cobreixen els aspectes teòrics i pràctics que conformen la realització d'aquest projecte. A continuació es descriu breument el contingut de cadascun d'aquests capítols.

Capítol 1. Introducció

En el primer capítol es dona a conèixer l'àmbit on es situa el projecte i les motivacions i objectius del mateix.

Capítol 2. Marc teòric

En aquest capítol s'explica, de manera resumida, tot allò que cal conèixer de la matèria del projecte, les allaus, així com els principals fonaments tècnics que ens permeten construir i implementar un model sobre aquestes.

Capítol 3. Modelatge

En el tercer capítol, definim globalment el model de simulació d'allaus de placa que servirà de base per a la construcció del simulador d'allaus.

Capítol 4. Anàlisi

En aquest capítol, s'analitza globalment que és el que s'ha d'esperar de l'aplicació i la manera de dur-la a terme, justificant les decisions preses.

Capítol 5. Especificació

En el capítol d'especificació, es descriuen els requisits que ha de satisfer el simulador i es defineixen l'arquitectura, la metodologia, el comportament i el model conceptual de l'aplicació.

Capítol 6. Disseny i implementació

En el sisè capítol es presenten les decisions de disseny de l'aplicació del simulador d'allaus. A la vegada, es comenten aquells detalls més significatius de la implementació.

Capítol 7. Experimentació

En el setè capítol s'avalua el funcionament del simulador, l'adaptació al model desenvolupat i el seu rendiment.

Capítol 8. Planificació

En el vuitè capítol es presenten la planificació inicial i la dedicació real per a la realització del projecte. Tanmateix, es descriu una estimació del cost del seu desenvolupament.

Capítol 9. Conclusions i treball futur

En aquest capítol es comenten globalment els resultats obtinguts i si compleixen les expectatives del projecte. Finalment es proposen les vies de continuïtat del present projecte.

Capítol 10. Índexs i Referències

En el desè capítol trobarem un recull de les figures, taules i quadres d'expressions aparegudes en el document, així com les principals fonts i referències del projecte.

Annex 1. Manual d'usuari

En l'annex del treball es descriu el funcionament de l'aplicació desenvolupada amb orientació a l'usuari final.

Material Electrònic

Amb la memòria s'inclou un CD que conté l'instal·lador de l'aplicació, la pròpia memòria en format pdf i un recull dels articles als quals es fa referència en el treball.

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Presentació

El projecte que presentem és un treball en el marc de la simulació i dels autòmats cel·lulars, resultat de la proposta d'en Pau Fonseca, director del projecte i professor del departament d'Estadística i Investigació Operativa, amb l'objectiu de modelar un tipus d'allau en concret i construir, en base aquest, la infraestructura per a la creació d'un simulador d'allaus emprant el paradigma event-scheduling sobre autòmats cel·lulars.

1.2. Motivació

Les zones d'alta muntanya, entenent aquestes com les situades per sobre dels 1.500 metres d'altitud en la nostra latitud, es troben sotmeses a la dinàmica inherent dels processos gravitacionals. Part d'aquest dinamisme constitueix l'anomenada perillositat del sistema nival. Aquest perill es converteix en un risc quan interaccionen els processos i agents nivals amb els socials, resultant vulnerada l'organització social del mitjà muntanyenc. L'estudi i control de les allaus ha pres una gran importància en les últimes dècades com a conseqüència del desenvolupament i de l'evolució socioeconòmica en les zones d'alta muntanya. Les allaus tenen unes implicacions socioeconòmiques importants pel que fa a la destrucció de recursos forestals, mitjans de comunicació i edificacions, a més d'agreujar l'activitat dels agents erosius en les àrees afectades. No obstant això, l'aspecte més preocupant ha estat el creixent nombre de vides humanes perdudes, sobretot d'esportistes i habitants de zones muntanyenques.

Donat aquest risc s'ha d'assumir que és absolutament necessari conèixer el fenomen i identificar i entendre els factors que intervenen en el moviment de la massa gelada.

Aquest coneixement contribuirà a predir el risc de desencadenament d'allaus i el seu impacte tant en l'espai com en el temps. Així mateix, s'està avançant en l'estat del coneixement per diversos fronts, tant científics, com tècnics i socials, per tal de poder dur a terme actuacions concretes i encertades de prevenció, defensa i autoprotecció.

Les línies d'investigació en l'àmbit científic estan basades en l'estudi del mantell nival i de la seva evolució. Mentrestant en l'àmbit tècnic i el social, les principals línies d'investigació es basen en la recopilació de dades històriques, estudis geoestadístics i

en l'aplicació de les noves tecnologies, així com en l'estudi de l'impacte de les allaus en el mitjà natural i en el social. Totes les línies d'investigació convergeixen en un objectiu comú: identificar i delimitar les zones amb risc d'allau.

1.3. Problemàtica

Molts problemes del camp de la indústria poden ser analitzats emprant la simulació discreta. En concret el paradigma de la simulació event-scheduling ha estat emprat durant dècades en la indústria oferint bons resultats. No obstant, encara que la simulació event-scheduling pugui representar la realitat de forma més propera que qualsevol altra aproximació, en altres sistemes com els models físics, químics o ecològics no presenta resultats similars. De fet, actualment encara és molt difícil representar aquests tipus de sistemes donat que el principal problema resideix en la seva naturalesa extremadament complexa.

Mitjançant l'ús de models microscòpics però, la simulació event-scheduling pot ser emprada per aquest tipus de sistemes. Aquests models simulen les característiques i interaccions d'entitats a nivell individual, la lògica de les quals inclou algorismes i regles que descriuen el seu comportament i la interacció amb altres entitats. D'aquesta manera, mitjançant l'addició d'un autòmat cel·lular a l'estructura del model aconseguirem reduir la complexitat del problema.

Encara que la predicció normalment no pot realitzar-se, existeixen uns importants beneficis que poden ser considerats, com la recollida de dades entre investigadors del domini, el reconeixement de forats en el coneixement, i és clar, una millor comprensió del sistema en una aproximació global.

Cal esmentar, abans de tot, que en aquest projecte emprarem la definició d'autòmat cel·lular m:n-AC [3], la qual ens permetrà treballar amb múltiples capes de dades.

1.4. Objectius

Definim formalment el que es pretén amb el desenvolupament d'aquest projecte. La idea global es redueix en 3 objectius principals: 1) Cercar, recopilar i **analitzar** la informació necessària referent al fenomen i escollir un tipus d'allau en concret, 2) **Modelar** l'allau escollit, en base a la documentació recopilada a la primera fase del projecte i del seu coneixement, mitjançant un model microscòpic de simulació discret

en espai i temps (autòmat cel·lular) i 3) **Implementar** un simulador d'allaus en base al model realitzat.

Per aconseguir aquest objectius principals s'ha de fer front a una sèrie d'objectius específics.

Pel que fa al modelatge, cal definir globalment el model de simulació del tipus d'allau escollit: **allaus de placa**, i realitzar una descripció completa de l'autòmat cel·lular que s'empra.

En quant a la construcció del simulador, a grans trets, cal que aquest permeti:

- importar diferents tipus de dades geogràfiques, reals o no, al sistema, per tal de generar un escenari virtual on es puguin realitzar la simulació del fenomen.
- definir la localització exacta del desencadenament de l'allau en l'escenari.
- executar el model de simulació quan l'usuari ho demani.
- representar gràficament l'escenari i el fenomen en tres dimensions mitjançant l'ús de la realitat virtual.
- extreure estadístiques i informació sobre l'allau generat i qualsevol punt de l'escenari.

No és objectiu del projecte validar el model, però, òbviament, els resultats que s'han d'obtenir d'aquest han d'aproximar-se als valors tipus de la realitat. Tampoc n'és objectiu implementar una interfície d'usuari definitiva ja que aquesta tasca queda fora del projecte actual. En quant a la representació del fenomen, cal mostrar els estats inicial i final, obviant el període entre aquests dos.

Pel que fa a la metodologia de treball la construcció de l'aplicació ha de seguir el cicle clàssic de l'enginyeria del software (anàlisi, especificació, disseny, implementació, experimentació). Tanmateix, cal tenir en compte que aquest només és el principi d'un projecte molt més ampli, així que cal que qualsevol part del model o del simulador sigui fàcilment canviable o modificable.

2. MARC TEÒRIC

2.1. Moviments de vessant

2.1.1. Introducció

Els processos geològics i climàtics que afecten a la superfície terrestre creen el relleu i defineixen la morfologia dels vessants, que va modificant-se al llarg del temps per adaptar-se a noves condicions geològiques o climàtiques. Generalment, els vessants adopten pendents naturals propers a l'equilibri i davant d'un canvi de condicions, la seva morfologia es modifica buscant de nou aquest equilibri. D'aquesta manera, els moviments poden entendre's com reajustaments del terreny per tal d'aconseguir l'equilibri davant d'un canvi de condicions.

Com àrees més propenses a la inestabilitat, sota un punt de vista global, trobem les zones muntanyoses, zones de relleu amb processos erosius i de meteorització intensos, vessants de valls fluvials, zones argiloses, zones sísmiques i zones d'altres precipitacions, entre d'altres.

Els lliscaments en vessants naturals poden ser profunds i mobilitzar milions de metres cúbics de material; els mecanismes de trencament, a més a més, solen ser complexos, estant condicionats per factors o processos a escala geològica (falles, processos tectònics, litorals, fluxos d'aigua subterrània, etc). Les inestabilitats en els vessants, es deuen al desequilibri entre les forces internes i externes que actuen sobre el terreny, de tal manera que les forces desestabilitzadores superen a les forces resistents. Aquest desequilibri pot ser degut a una modificació de les forces existents o a l'aplicació de noves forces externes estàtiques o dinàmiques.

Els moviments de vessant engloben diferents tipus de processos, com per exemple: lliscaments, despreniments, fluxos i colades de fang, reptació, devessalls rocosos o de neu, entre d'altres.

2.1.2. Classificació bàsica

Les classificacions dels moviments de vessant solen referir-se als tipus de materials involucrats i al mecanisme i tipus de ruptura, considerant també altres aspectes com el

contingut en aigua del terreny, i la velocitat i magnitud del moviment. A continuació descrivim la tipologia d'aquest tipus de fenòmens.

Lliscaments

Els lliscaments són característics de masses de roca en les que existeix una superfície de trencament que separa la roca desplaçada de la subjacent o substrat immòbil. Aquesta superfície de trencament pot ser una superfície d'estratificació, una capa de materials plàstics o discontinuïtats tectòniques.

El desencadenament d'aquest fenomen té lloc quan l'esforç tangencial derivat del pes del bloc supera el fregament intern de la superfície de trencament. Es evident que com major sigui el pendent major serà la facilitat en que apareguin aquests fenòmens, de la mateixa manera que si la presència d'aigua (subterrània, de pluja o de regadiu) és abundant entre les discontinuïtats de la roca. Per un costat, si la roca està impregnada d'aigua, augmentarà el pes del bloc, i per un altre costat el fregament intern es veurà disminuït en el pla de trencament.

La massa, generalment, es desplaça en conjunt, comportant-se com una unitat en el seu recorregut; la velocitat pot ser molt variable, però acostumen a ser processos ràpids que poden assolir grans volums (varis milions de metres cúbics). En ocasions, quan el material lliscat no assoleix l'equilibri al peu del vessant, per la seva pèrdua de resistència, contingut en aigua o pel pendent existent, la massa pot seguir en moviment i assolir velocitats molt elevades, donant lloc a un flux. Existeixen dos tipus de lliscament clarament diferenciats:

Els lliscaments rotacionals són més freqüents en sòls cohesius. La ruptura, superficial o profunda, té lloc a favor de superfícies corbes. Una vegada iniciada la inestabilitat, la massa comença a rotar dividint-se en varis blocs que llisquen entre sí, donant lloc a una superfície esglaonada basculada cap al pendent i amb esquerdes de tracció estriades. Les dimensions d'aquests fenòmens poden arribar als centenars de metres, tant en longitud com en amplada, i poden ser superficials o profunds (fins a 10 metres màxim). La part inferior de la massa lliscada s'acumula al peu del vessant formant un dipòsit, normalment amb esclatxes de tracció transversals. Depenent del tipus de sòl i del contingut d'aigua es poden generar fluxos.

En els lliscaments traslacionals la ruptura té lloc en superfícies planes de debilitat preexistents (superfície d'estratificació, contacte entre diferents tipus de material, superfície estructural, etc); en ocasions, el pla de ruptura és una fina capa de material argilós entre estrats de major competència. No solen ser molt profunds, encara que si extensos i assoleixen grans distàncies. Poden donar-se en sòls i en roques, i les masses

que llisquen en ocasions són blocs rectangulars prèviament independitzats per discontinuïtats o per escletxes de tracció (lliscament de blocs). Són freqüents en aquest tipus d'inestabilitats els moviments a impulsos, es a dir, en fases diferents en el temps, segons siguin les condicions de resistència dels plans de lliscament, que no tenen perquè presentar un gran pendent. Generalment, els desplaçaments traslacionals són més ràpids que els rotacionals, degut a la cinemàtica del mecanisme de ruptura.

Fluxos

Els fluxos, o colades, són moviments de masses de sòl, acumulacions de fragments de roca o blocs rocosos, amb abundant presència d'aigua, on el material està disgregat i es comporta com un fluid, patint una deformació continua sense presentar superfícies de ruptura definides. L'aigua és el principal agent desencadenant degut a la pèrdua de resistència que origina en materials poc cohesius. Principalment, afecten a sòls argilosos que pateixen una notable pèrdua de resistència al ser mobilitzats; aquests moviments, poc profunds en relació a la seva extensió, presenten una morfologia de tipus glacera i poden tenir lloc en vessants de baixes pendents (inclús menors a 10 graus). Aquests moviments poden arribar a assolir varis quilometres.

Les colades de fang sorgeixen quan tot el material del vessant es sobrehidrata i flueix cap als fons de la vall. La caiguda del material és contínua i brusca degut a que aquest conté la suficient aigua per augmentar la plasticitat i la fluïdesa de la superfície, conferint-li d'aquesta manera una gran mobilitat encara que el pendent no sigui gaire pronunciada.

Les colades de fang generalment es presenten en petites magnituds, però en determinades condicions de saturació, poden ser molt extenses i ràpides. Els dipòsits de materials volcànics, per les seves propietats físiques i geomecàniques, són especialment susceptibles a aquest tipus de processos. La velocitat de la massa que llisca és més gran a la part superior que a la inferior.

En els sòls de tipus *loess* (dipòsits de material fi no consolidat) i en arenes seques poden tenir lloc fluxos induïts per moviments sísmics, provocats generalment per col·lapses deguts a la ruptura dels enllaços entre partícules; si aquests materials es troben saturats o submergits, es crea una massa sense cohesió que pot fluir amb velocitats molt elevades.

Els fluxos de fragments de roca són moviments complexos que engloben fragments rocosos, blocs, cantells i grava en una matriu d'arenes, llims i argila. Tenen lloc en vessants coberts per material no consolidat, com és el cas dels dipòsits de morrenes glacials i, especialment, en aquells on no existeix cobertura vegetal. Normalment l'àrea

font d'aquests fluxos varia entre els 20 i els 45 graus d'inclinació i en la zona d'acumulació entre 5 i 15 graus, assolint els processos velocitats fins als 15m/s.

Els fluxos poden ser conseqüència de lliscaments o ser induïts per despreniments. Juntament amb els lliscaments són els moviments de vessant més habituals, al afectar a molt diversos tipus de materials.

Reptació

Moviment superficial molt lent, pràcticament imperceptible, que afecta a sòls i materials alterats, provocant deformacions contínues que es manifesten al cap d'un temps en la inclinació o manca d'alineació d'arbres, tanques, murs, pals, etc, en els vessants.

Solifluxió

La solifluxió afecta a la zona més superficial dels vessants. Es tracta d'un moviment produït pels processos de congelació i fusió que, pels canvis diaris o estacionals de temperatura, afecta a l'aigua continguda en els sòls.

Despreniments

Els despreniments són processos que es caracteritzen per la caiguda lliure de blocs individuals de massa rocosa de diversa grandària, a vegades considerable, independitzats per plans de discontinuïtat preexistents (tectònics, superfícies d'estratificació, escletxes de tracció, etc). Són habituals en vessants de zones muntanyoses escarpades, en penya-segats i, en general, en parets rocoses, essent freqüents les ruptures en forma de cunya i en blocs formats per varies famílies de discontinuïtats. Els principals desencadenants són la erosió, la pèrdua de recolzament, la presència d'aigua en discontinuïtats i escletxes, els moviments sísmics, entre d'altres.

Devessalls rocosos

Aquests processos, considerats com despreniments o moviments complexos en algunes classificacions, són molt ràpids, amb caiguda de masses de roca que es desprenen de vessants escarpats i que poden anar acompanyades de gel i neu. Les masses rocoses es trenquen i es polvoritzen durant la caiguda, donant lloc a dipòsits amb una distribució caòtica de blocs, amb grandàries molt diverses, sense estructura, pràcticament sense abrasió i amb gran porositat.

Els devessalls són generalment el resultat de lliscaments o despreniments de gran magnitud que, per l'elevació del pendent i la manca d'estructura i cohesió dels materials, descendeixen vessant avall a gran velocitat podent superar els 100km/hora.

L'aigua de precipitacions o de desgel, els moviments sísmics i les erupcions volcàniques poden jugar un paper important en el desencadenament d'aquests processos.

Desplaçaments laterals

Aquest tipus de moviment fa referència al moviment de blocs rocosos o masses de sòl molt coherent i cimentat sobre un material tou i deformable. Els blocs es desplacen molt lentament a favor de pendents molt baixes. Els moviments són deguts a la pèrdua de resistència del material subjacent, que flueix o es deforma sota el pes dels blocs rígids. Els desplaçaments laterals també poden ser provocats per líquüefacció del material subjacent o per processos d'extrusió lateral d'argiles toves i humides, sota el pes de les masses superiors. Es donen en vessants molt suaus, i poden ser molt extensos. Les capes superiors es fragmenten generant escletxes, desplaçaments diferencials, bolcades, etc, presentant les zones afectades un aspecte caòtic.

2.2. Allaus

2.2.1. Definicions

- S'entén per allau al despreniment d'una massa de neu, de dimensions i recorregut variables, en un pendent. (Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), 2002).
- Una allau és una massa de neu que es desprèn i es precipita pel vessant d'una muntanya. (Association national pour l'étude de la neige et des avalanches (ANENA), 2002).

2.2.2. Factors que intervenen en el fenomen

A continuació enumerem els principals factors que intervenen en la formació de les allaus. La importància d'aquests variarà segons el tipus de neu que conformi l'allau.

- a) Espessor de la capa de neu.
- b) Cohesió interna de la neu.

- c) Estat de la superfície de la roca subjacent.
- d) Grau de pendent del vessant.
- e) Condicions meteorològiques.

2.2.3. Classificació bàsica

Segons l'Institut de Cartografia de Catalunya, qualsevol fenomen d'allau es pot englobar en un dels següents tipus bàsics.

1) Allaus de neu recent

Les anomenades **allaus de neu recent** són les produïdes durant o just després d'intenses nevades. El desencadenament d'aquesta varietat d'allau es produeix principalment a causa de la pèrdua de cohesió de la capa superficial per sobrecarrega o per l'augment de la temperatura durant o després de la nevada.

Dins d'aquesta categoria cal fer una distinció entre **allaus de neu humida** i **allaus de neu seca**. Les primeres són degudes a nevades en temperatures properes als 0°C, mentre que les segones són degudes a nevades en temperatures notablement inferiors als 0°C. Aquestes últimes es produeixen en els períodes més freds d'hivern i són molt ràpides i destructives.

2) Allaus de fusió

Les **allaus de fusió** són degudes al desglaç del mantell nival quan la temperatura de l'aire augmenta notablement per sobre dels 0°C o bé en cas de pluja.

La neu és humida i feixuga, pel que la velocitat de lliscament és lenta. Aquesta varietat d'allaus es produeix principalment en primavera o en períodes calorosos d'hivern i són les més comuns.

Es pot donar el cas de que el mantell nival llisqui en la seva totalitat, arrossegant fang, roques o vegetació. Aquestes subtipus d'allaus són anomenades **allaus de fons**.

3) Allaus de placa

Les **allaus de placa**, les quals han acabat sent escollides com objecte de modelatge en aquets projecte, són degudes a l'existència de discontinuïtats en el mantell nival que provoquen el lliscament de les capes superiors, aparentment estables, per damunt d'una capa de baixa cohesió o una superfície de regel.

Un cas particular són les dures i fràgils **plaques de vent** que es formen en la part superior del mantell, originades per l'acumulació de neu transportada pel vent de sobrevent a sotavent.

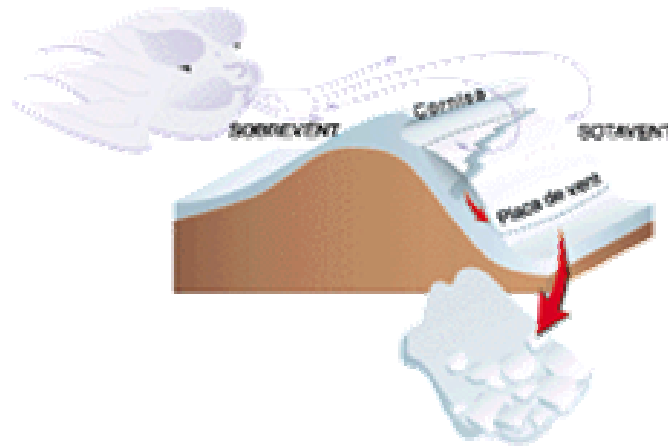


Figura 2.1 – Formació de plaques de vent

Aquests tipus d'allaus, que es donen tant en hivern com en primavera, es produeixen en vessants oberts, sobretot en zones convexes, i poden ser de causa natural (precipitació de pluja, acció del vent, sobrepès de neu, precipitació de roques, pas d'animals, ...) o d'origen humà (pas de maquinaria o de persones).

2.2.4. Nivells d'una allau

Definicions:

- 1) **Zona de sortida:** és la zona on la neu inestable comença el desplaçament. Hi ha una acceleració significativa de la massa de neu.
- 2) **Zona de trajecte:** és el pendent que connecta la zona de sortida amb la zona de dipòsit. La velocitat de l'allau arriba al seu màxim valor. Es produeixen incorporacions i/o pèrdues de neu.
- 3) **Zona de dipòsit:** és l'àrea on es produeix la desacceleració i el flux es diposita.

Característiques de cada nivell:

1) Zona de sortida

- Tipus de sortida
 - Espontània: causes internes del mantell nival.

- Provocada: causes externes del mantell nival. Les causes poden ser antròpiques o no antròpiques. Les antròpiques poden ser voluntàries (allaus artificials) o involuntàries (allaus accidentals).
- Forma de sortida
 - Puntual: allau que parteix d'un punt.
 - Lineal: allau que parteix d'una línia.
- Qualitat de la neu – Tipus
 - Recent.
 - Evolucionada.
- Qualitat de la neu – Contingut en aigua
 - Nul – Neu seca.
 - Dèbil – Neu humida.
 - Fort – Neu mullada.
- Qualitat de la neu – Cohesió
 - Dèbil – Neu en pols.
 - Moderada – Placa friable.
 - Forta – Placa dura.
- Posició del pla de lliscament
 - En el mantell nival.
 - Sobre el sòl.

2) Zona de trajecte

- Forma del terreny
 - Pendent oberta.
 - Canal.
- Dinàmica de flux
 - Sense núvol de partícules de neu.
 - Amb núvol de partícules de neu (aerosol), que pot estar situat en el front o la cua d'aquesta (amb estela).
 - Només format per partícules de neu (aerosol pur).
- Neu incorporada
 - Amb incorporacions.
 - Sense incorporacions.

- Presència de blocs i/o altres elements
 - Presents (blocs de neu o gel, roques, vegetació, etc).
 - No presents.

3) Zona de dipòsit

- Rugositat superficial
 - Dèbil.
 - Forta (en blocs o boles).
- Qualitat de la neu
 - Humida.
 - Seca.
- Brutícia visible
 - Contaminat (Presencia de terra, roques o vegetació).
 - Net.

2.2.5. El mantell nival

El mantell nival es compon d'una estratificació de capes de neu corresponent a les diverses nevades que es produeixen al llarg de la temporada. Cada capa o estrat de neu presenta unes característiques morfològiques, termodinàmiques i mecàniques concretes. Aquestes característiques són les que proporcionen al mantell un determinat grau d'estabilitat i, per tant, condicionen la possibilitat que puguin produir-se allaus. En funció dels elements meteorològics el mantell nival va evolucionant d'un estat a un altre, variant per tant el seu grau d'estabilitat.

Anàlisi del mantell nival

Els sondeigs per colpeix i els perfils estratigràfics permeten conèixer l'estructura del mantell en un lloc i moment concrets. A partir d'aquests anàlisis i conjuntament amb les dades nivometereològiques diàries s'elaboren els butlletins de predicció d'allaus.

El sondeig per colpeix consisteix en fer penetrar al mantell una sonda amb una mida i un pes determinat (sonda Haefeli), i calcular la resistència que ofereix a la penetració. La resistència a la penetració dóna idea de la cohesió de cada capa de neu. Posteriorment es realitza el perfil estratigràfic, que consisteix en fer un tall vertical a la neu de manera que totes les capes quedin a la vista i puguin ser descrites en detall (tipus i diàmetre dels grans, humitat, duresa i densitat), i finalment s'efectua un perfil de temperatura, mesurant aquest paràmetre cada 10 cm, des de la superfície fins a la

base del mantell. Amb les dades obtingudes és possible localitzar punts dèbils en l'estratificació del mantell nival, com per exemple plans de lliscament, capes inestables, etc.

2.2.6. Escala europea de perill d'allaus

| Índex | Estabilitat del mantell nival | Probabilitat de desencadenament |
|---------------------|---|---|
| 1) Feble | El mantell nival està ben estabilitzat a la majoria dels pendents. | El desencadenament d'allaus és possible en alguns pendents drets, en general per una sobrecàrrega forta. Poden haver-hi caigudes espontànies de petites allaus. |
| 2) Moderat | El mantell nival està moderadament estabilitzat en alguns pendents suficientment drets. A la resta està ben estabilitzat. | És possible el desencadenament d'allaus sobretot per una sobrecàrrega forta i en alguns pendents d'orientació i altitud indicats. No s'esperen caigudes espontànies d'allaus de gran dimensions. |
| 3) Marcat | El mantell nival està entre moderadament a feblement estabilitzat en nombrosos pendents suficientment drets. | És possible el desencadenament d'allaus fins i tot per una sobrecàrrega feble en nombrosos pendents. En algunes situacions són possibles les caigudes espontànies d'allaus que poden ser de mida mitjana i, de vegades, gran. |
| 4) Fort | El mantell nival està feblement estabilitzat a la major part dels pendents suficientment drets. | És probable el desencadenament d'allaus fins i tot per una sobrecàrrega feble i sobretot en nombrosos pendents. En algunes ocasions, s'han d'esperar nombroses caigudes espontànies d'allaus de mida mitjana i, de vegades, gran. |
| 5) Molt Fort | La inestabilitat del mantell nival és generalitzada. | Hi haurà nombroses caigudes espontànies de grans allaus, fins i tot en pendents poc drets. |

Taula 2.1 – Escala de perillositat de les allaus

2.3. Dinàmica d'allaus

2.3.1. Força impulsora i forces de resistència

Al produir-se la fractura en una placa, la massa de neu accelera en el sentit del pendent, lliscant sobre una altra capa de neu o sobre el sòl.

Dos conjunts oposats de forces actuen en l'allau: la força impulsora (F), component paral·lel a la superfície que actua en el sentit del pendent, i la força de resistència (R), que està composta per diverses forces oposades a la força impulsora i que prevenen que l'allau acceleri indefinidament.

La força impulsora i les forces de resistència actuen en la massa en moviment determinant la seva acceleració i velocitat màxima. La importància de les diverses forces de resistència depenen del tipus d'allau.

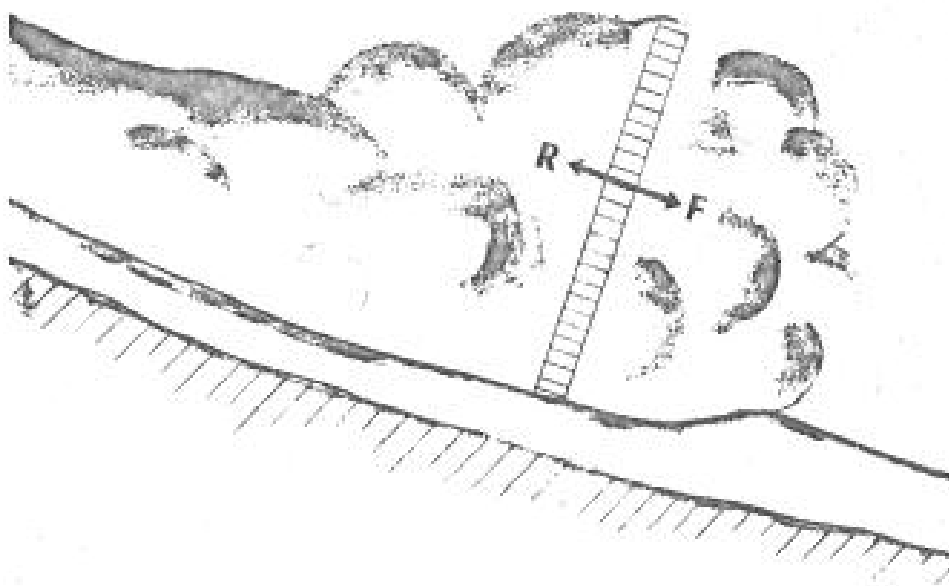


Figura 2.2 – Força impulsora i forces de resistència

L'allau accelerarà mentre F sigui superior a R donat que existirà una força neta (i una acceleració resultant) en el sentit del pendent. La condició $F > R$ és satisfeta en la zona de sortida. Aquí la acceleració ocorre perquè el pendent és pronunciada i, per tant, la força d'impulsió F és gran. Addicionalment, la neu inestable de la zona de sortida pot anar-se incorporant a l'allau causant l'augment de la massa en moviment.

Es defineix, normalment, la zona de sortida com l'àrea que suporta l'allau on el desnivell del pendent supera els 30° (58%). Aquesta àrea habitualment és major que la superfície de la massa de neu inicial de l'allau.

La massa assoleix una velocitat constant quan R iguala a F . Aquesta condició de màxima velocitat ocorre en la transició entre la zona de sortida i la zona de dipòsit. Aquesta àrea de transició és normalment coneguda com àrea de recorregut. En aquesta zona la velocitat canvia contínuament segons canvis en el gradient, entrada de neu nova, deposició i irregularitats topogràfiques.

La desacceleració succeeix en la zona de dipòsit, on R és superior a F . Aquí el gradient es redueix i com a resultat la força impulsora també és reduïda. A més a més, la capa subjacent de la neu és estable i l'energia cinètica del flux es va dissipant.

La distribució del dipòsit de l'allau defineix els límits de la zona de dipòsit i probablement depèn més del tipus de neu i les característiques de l'allau que de la rugositat de la superfície d'aquesta zona.

Tot això es aplicable a totes les allaus sense importar el tipus ni la grandària. Totes comencen en una zona de sortida i acaben en una zona de dipòsit. En qualsevol d'aquests fenòmens el tipus i la quantitat de neu incorporada a l'allau determina el balanç entre forces, la velocitat, les dimensions, la quantitat de neu entrant i la localització de la zona de dipòsit. Com succeeix en la majoria de fenòmens naturals, existeix una relació inversa entre grandària i probabilitat de l'esdeveniment.

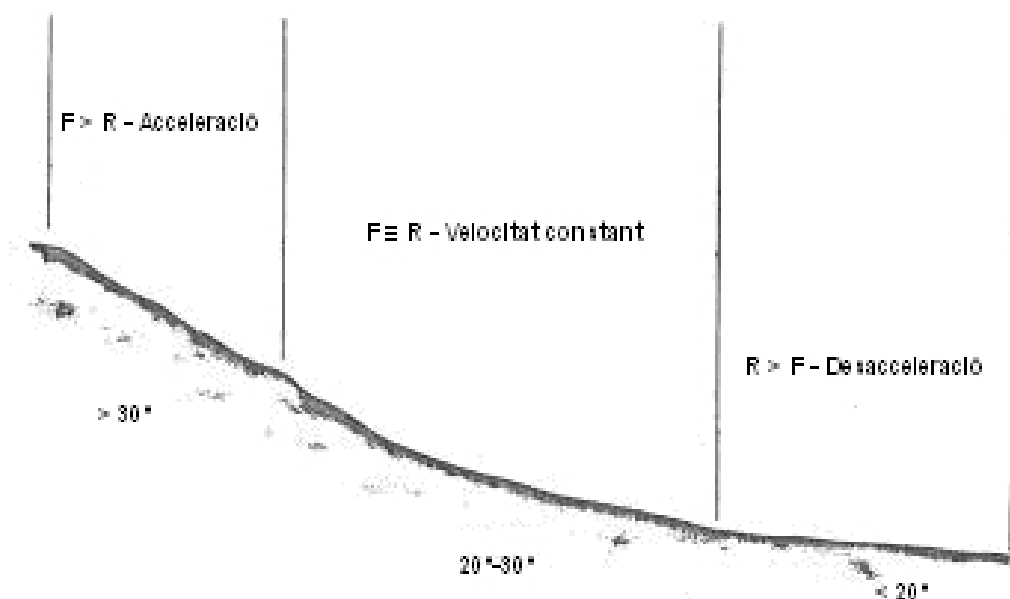


Figura 2.3 – Pendent i forces

2.3.2. Forces de resistència i tipus de neu

Els següents són els principals factors que contribueixen a la resistència friccional de l'allau:

R1: Fricció de lliscament entre l'allau i la neu subjacent o el sòl.

R2: Forces de resistència internes de la neu degut a la cohesió, col·lisions i canvis en la quantitat de moviment.

R3: Fricció de turbulència en la suspensió neu/aire.

R4: Fricció de tall entre l'allau i l'aire circumdant.

R5: Fricció amb fluids al front de l'allau.

La força neta d'acceleració de l'allau és la suma de totes les forces que actuen en ella.

Expressió 2.1 – Acceleració d'una allau [8]

$$a = \frac{F - (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)}{\text{massa}_{\text{allau}}}$$

On F és la força impulsora. La importància relativa de cada component de la resistència variarà segons el tipus d'allau. El tipus de neu de l'allau, tanmateix, depèn de les característiques de la capa de neu anterior al desencadenament de l'allau, en el tipus de neu que es troba en el camí i en la topografia d'aquest. En una allau de neu seca la densitat i la força mecànica de la placa llançada probablement determina la importància de les diverses resistències.

En plaques dures la neu està consolidada fortament. Abans de l'inici de l'allau la majoria de la massa de neu està aparentment composta per blocs relativament grans (probablement de 10 a 100 cm de llargada). Aquests blocs llisquen, giren, boten i col·lisionen entre ells però a causa de la seva gran grandària i velocitat els grans de neu mai arriben a entrar en suspensió. La massa es mou com si fos una cascada de blocs de neu discrets i l'allau mai arriba a esdevenir *flux*. La resistència al moviment la produeixen principalment les forces R1 i R2. Les 3 restants probablement contribueixen mínimament.

Després d'un desencadenament d'una placa tova, la desintegració i la incorporació d'aire són molt ràpids i part de la massa queda suspesa per sobre de la superfície. Com a resultat del creixent increment de partícules de neu en suspensió, l'alçada i velocitat del flux augmenten i l'allau pren forma de fluid i, per tant, les forces R1 i R2 veuen disminuïda la seva importància. Les partícules de neu més petites poden enlairar-se

mentre que la massa més densa, compresa per partícules de neu més grans, roman lliscant sobre la superfície.

Les allaus de neu pols poden arribar a assolir grans velocitats (aproximadament 60m/s) i poden viatjar grans distàncies en pendents no gaire pronunciades (baix gradient). El despreniment de neu tova i seca desencadena una allau de pols i en forma de flux (mig i mig).

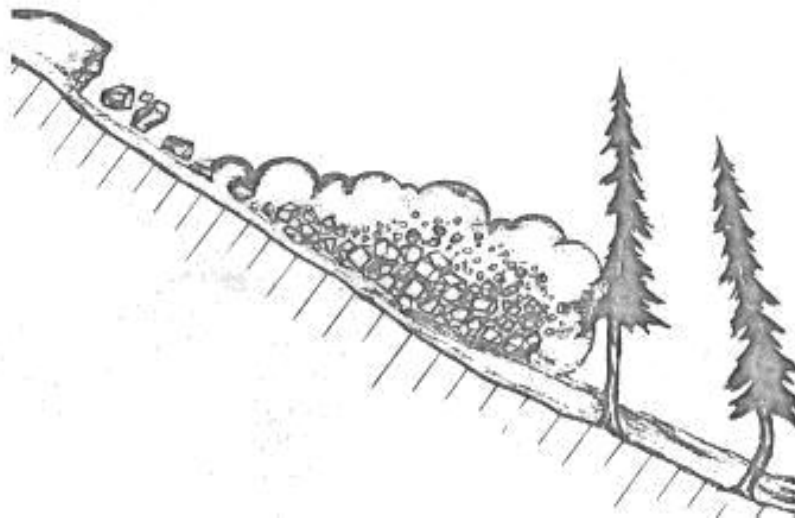


Figura 2.4 – Allau de placa dura

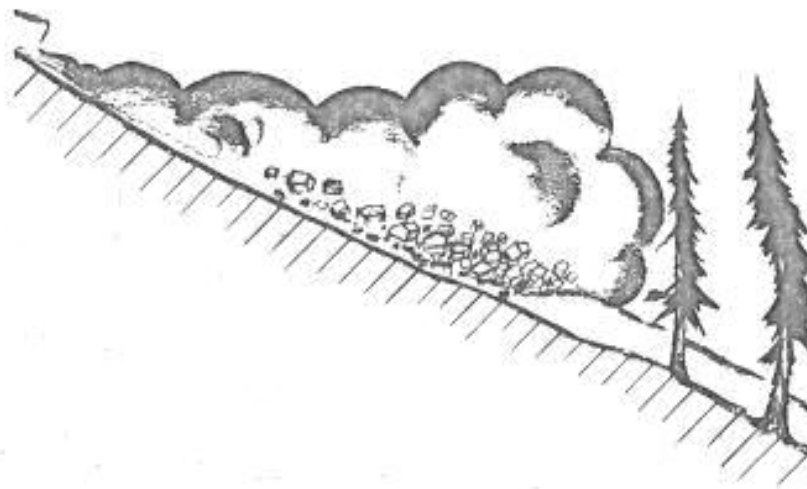


Figura 2.5 – Allau de placa tova

Les allaus resultants del despreniment de neu humida, tant per fractures de placa com per desencadenaments puntuals, usualment es desintegren ràpidament en una massa pastosa que assoleix relativament baixes velocitats. Com que hi ha poca entrada d'aire en les allaus d'aquests tipus el flux no assoleix grans alçades. Les forces de resistència

R1 i R2 són molt més importants que R3, R4 i R5. No obstant, tot i que les velocitats són baixes, les allaus de neu mullada poden ser molt perilloses en el seu impacte donada l'alta densitat d'aquestes masses de neu.

Velocitat aproximada d'una allau segons el tipus de neu i grandària:

| | Petita | Mitjana | Gran |
|-------------------|--------|---------------|---------------|
| Neu humida | <10m/s | 10m/s – 20m/s | 20m/s – 35m/s |
| Neu seca | <10m/s | 10m/s – 35m/s | 35m/s – 60m/s |
| Neu pols | <25m/s | 25m/s – 60m/s | 60m/s – 90m/s |

Taula 2.2 – Velocitat d'una allau segons el tipus de neu [8]

2.3.3. Impacte de les allaus

Les allaus poden produir grans forces dinàmiques sobre els objectes. El coneixement d'aquestes forces esdevé fonamental en el disseny de construccions ubicades en camins d'allaus.

Allaus de neu seca (alta velocitat i baixa densitat), fluiran per sobre i pels costats dels objectes, engolint-los com si fos un autèntic fluid. Això produeix una pressió d'estancament, que pot ser calculada de la següent manera:

Expressió 2.2 – Pressió d'allaus de neu seca [8]

$$P = \frac{1}{2} p V^2$$

On P és la pressió, p és la densitat de l'allau i V la velocitat. La força total sobre l'objecte la podem calcular mitjançant la multiplicació de la pressió per l'àrea de la superfície exposada i un coeficient de fregament.

Les allaus lentes i denses, per contra, no engoliran els objectes, si no que part de la massa s'acumularà al costat de l'objecte i una altra part sortirà desviada. En aquests casos la pressió total pot ser calculada segons indica l'expressió 2.3, així la pressió d'allaus denses i lentes serà el doble que la de les allaus de baixa densitat i ràpides.

Expressió 2.3 – Pressió d'allaus denses [8]

$$P = p V^2$$

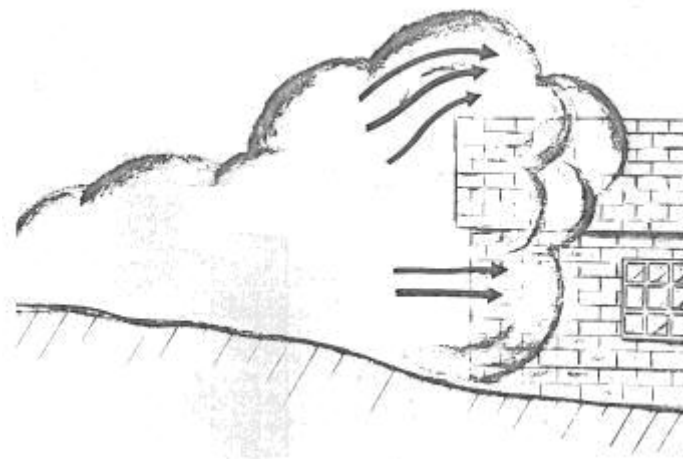


Figura 2.6 – Impacte d'una allau de neu seca o de neu pols

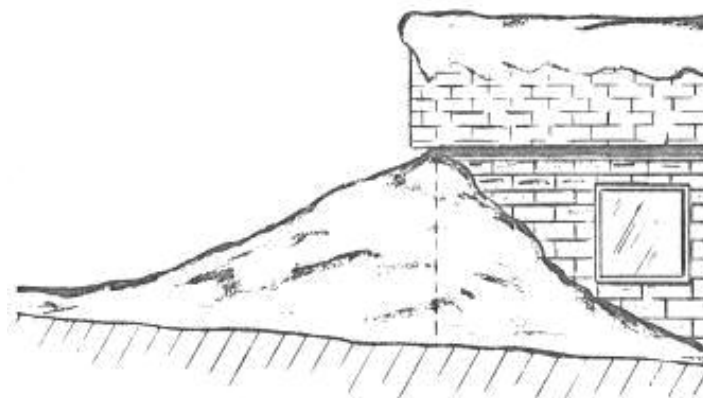


Figura 2.7 – Impacte d'una allau de neu humida

2.4. Sistemes d'informació Geogràfica

2.4.1. Introducció

Un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG) és un sistema integrat format per hardware, software, personal, informació espacial i procediments computeritzats, amb uns objectius específics que possibiliten el modelatge de la realitat creant imatges abstractes d'una realitat més complexa permetent el seu estudi, anàlisi i gestió.

Per a donar suport a aquest modelatge, els SIG's compten amb les estructures lògiques que possibiliten emprar simultàniament informació gràfica i alfanumèrica. Aquesta manipulació conjunta de dades es realitza establint un codi entre l'element gràfic i un descriptor alfanumèric que els caracteritza. El codi referit correspon bàsicament a la utilització d'un sistema de localització espacial referencial, que possibilita individualitzar sobre el terreny cadascun dels elements o fenòmens modelats.

En quant a les funcions d'un SIG aquestes es poden generalitzar en 3 categories: aquelles destinades a l'ingrés d'informació al sistema, al processament i manipulació de la informació i a la generació d'informes i cartografia resultant de les anàlisis.

2.4.2. Construcció de bases de dades geogràfiques

La construcció d'una base de dades geogràfica implica un procés d'abstracció per a passar de la complexitat del món real a una representació simplificada que pugui ser processada informàticament. Aquest procés d'abstracció té diversos nivells i normalment comença amb la concepció de l'estructura de la base de dades, generalment en capes. En aquesta fase, i depenent de la utilitat que es vagi a donar a la informació a compilar, es seleccionen les capes temàtiques a incloure.

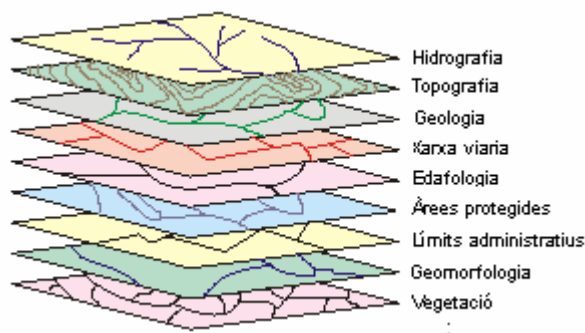


Figura 2.8 – Estructuració d'informació geogràfica en capes

Però l'estructuració de la informació espacial procedent del món real en capes comporta cert nivell de dificultat. En primer lloc, la necessitat d'abstracció que requereixen les màquines implica treballar amb primitives bàsiques de dibuix, de tal forma que tota la complexitat de la realitat ha de ser reduïda a punts, línies o polígons.

En segon lloc, existeixen relacions espacials entre els objectes geogràfics que el sistema no pot obviar; la topologia, que en realitat és el mètode matemàtic-lògic usat per a definir les relacions espacials entre els objectes geogràfics pot arribar a ser molt complexa, degut a que són molts els elements que interactuen sobre cada aspecte de la realitat.

La topologia d'un SIG redueix les seves funcions a qüestions molt més senzilles, com per exemple conèixer el polígon (o polígons) que pertany una determinada línia, o bé saber quina agrupació de línies formen una determinada carretera.

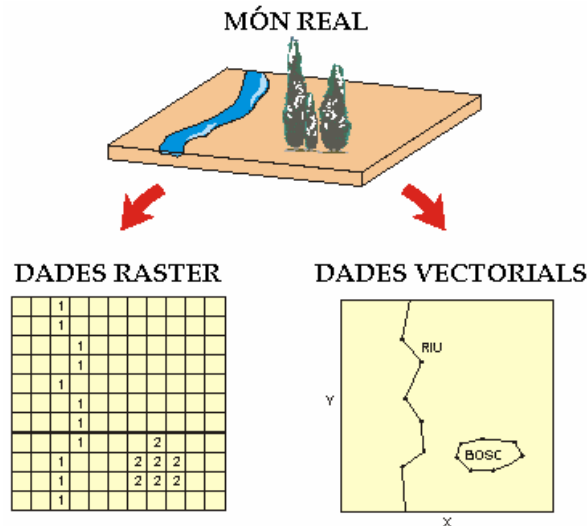


Figura 2.9 – Modelització geogràfica de la realitat

Existeixen diverses formes de modelar les relacions entre els objectes geogràfics o topologia. Depenent de la forma que això es porti a terme es té un o altre tipus de Sistema d'Informació Geogràfica dins d'una estructura de dos grups principals: SIG vectorials i SIG raster. No existeix un model de dades que sigui superior a un altre, sinó que cadascun té una utilitat específica.

2.4.3. Model raster

El model de SIG raster es centra en les propietats de l'espai més que en la precisió de la localització. Divideix l'espai en cel·les regulars on cadascuna representa un únic valor. Quant majors siguin les dimensions de les cel·les menor serà la precisió o detall en la representació de l'espai geogràfic.

Codificació Raster: En un model raster, l'origen per a la numeració de cel·les és el cantó superior esquerra de la imatge. Amb la rasterització s'assignen codis a les cel·les segons tres tipus de mostreig:

- Modal: el més representatiu de la cel·la.
- Punt mig: el que representi el punt central de cel·la.
- Lògic: si una entitat en qüestió apareix o no.

Emmagatzematge Raster: Les cel·les poden prendre un valor sencer (variables discretes) o reals (variables contínues). També poden haver cel·les amb valor nul o desconegut (No data). Els valors de les cel·les es poden emmagatzemar en espais de memòria distribuïts en diferents formes i a partir de diverses modalitats de lectura.

Distribució:

- per enumeració exhaustiva: 2,2,2,0,3,3,1,2,2,2,1,1,3,3,3,3,3,1,1,3,3,3,0.
- per grups de longitud variable: 2-3, 0-1, 3-3, 1-1, 2-3, 1-2, 3-6, 1-2, 3-3, 0-1.

Modalitats de lectura:



Figura 2.10 – Modalitats de lectura en fitxers raster

2.4.4. Model vectorial

En el cas del model de SIG vectorial, l'interès de les representacions es centra en la precisió de localització dels elements sobre l'espai.

Al principi els SIG varen emprar estructures d'emmagatzematge vectorial molt simples com els *Spaghetti* i els *Diccionaris de vèrtexs* que no aconseguien tractar relacions topològiques.

Actualment s'usa l'estructura *Arc-node*, en la qual el sistema pot identificar relacions com la inclusió, la adjacència, entre d'altres, gràcies a un conjunt de taules topològiques, una per a polígons, una per a arcs i finalment una per a nodes. En una mateixa capa no és necessari repetir segments, distingint-se igualment la topologia.

Per exemple, si els polígons comparteixen un mateix arc llavors hi ha *adjacència de polígons*; si hi ha un node inicial o final repetit en dos arcs llavors hi ha *connectivitat d'arcs*; si hi ha un registre negatiu significa que hi ha *inclusió* d'una figura en una altra.

2.4.5. Raster VS vectorial

Avantatges del model raster:

- Estructura més simple.
- Assimilació més directa de dades de sensors remots.
- Operacions de superposició més senzilles.
- Anàlisis espacials com distribució, densitat i de superfície, més eficients.
- La unitat espacial conserva la mateixa forma i grandària de manera que es faciliten les simulacions.

- Útil per a anàlisis de grans extensions amb baixa precisió de propietats espacials.

Desavantatges del model raster:

- Alt nivell d'error en estimacions d'àrea, perímetre i longitud.
- Gran augment de l'espai d'emmagatzematge a mesura que augmenta la resolució.
- Desaprofitament d'espai d'emmagatzematge per a dades espacials molt espargides.
- Anàlisis de xarxes molt complexos i menys consistents.
- Transformació de coordenades menys eficient.

Avantatges del model vectorial:

- Bona similitud de les formes.
- Càlcul més precís d'àrees, perímetres i longituds.
- Anàlisis de xarxes més consistents.
- Es poden adaptar sota bases de dades orientades a objectes.

Desavantatges del model vectorial:

- Estructura més complexa.
- Les superposicions exigeixen una major verificació d'errors i poden oferir un menor rendiment.
- La diferent topologia de les unitats espacials dificulta els exercicis de simulació.

| | Raster | Vectorial |
|-------------------------------|--------|-----------|
| precisió gràfica | — | + |
| cartografia tradicional | — | + |
| volum de dades | — | + |
| topologia | — | + |
| operacions de càlcul | + | — |
| actualització | + | — |
| variació espacial continua | + | — |
| integració | + | — |
| variació espacial discontinua | — | + |

Taula 2.3 – Model raster VS Model vectorial

2.4.6. Fitxers SIG

Descrivim a continuació dos sistemes d'arxiu de representació d'informació geogràfica força estesos: GML2 i Idrisi32. Un anàlisi exhaustiu sobre els diferents tipus de

representació SIG existents el podem trobar en el PFC *Integración de datos SIG en un simulador* de Sergio Liminiana [17].

GML2

GML2 (Geography Markup Language) és un subllenguatge d'XML proposat pel OpenGeospatial Consortium (OGC) per a l'intercanvi i emmagatzematge d'informació espacial, tant de propietats espacials com no espacials dels elements geogràfics. Aquest tipus de fitxer es pot considerar com a vectorial, doncs els elements geogràfics són descrits mitjançant punts, línies, polilínies, polígons, etc

L'especificació descriu l'XML Schema que dona la sintaxis, mecanismes i conversions per a codificar informació geogràfica. GML2 no conté informació específica sobre com s'ha de realitzar la visualització de les dades representades. Per a això s'utilitzen estils que es connecten a GML2 i es descriuen en altres subllenguatges d'XML. Altres extensions utilitzades per GML2 inclouen SMIL per a definir elements d'interacció i XPointer per a representar metadades.

GML2 utilitza la noció d'element geogràfic, que pot descriure's com la representació abstracta d'un o diversos fenòmens, generalment associats a una localitat sobre la Terra. Per a descriure els elements geogràfics, GML2 representa valors tals com sistemes de coordenades, geometria, topologia, temps, unitats de mesura i altres valors. L'estat d'un element geogràfic s'estableix com valors d'un conjunt de propietats. Un element geogràfic pot estar representat per una col·lecció d'altres elements més les seves pròpies propietats.

GML2 empra també les nocions de cobertura i observació. Una cobertura permet representar relacions espacials entre diferents elements amb la finalitat de produir una representació visual d'un fenomen. Una observació modela el valor d'una o diverses propietats d'un element geogràfic observades en un moment determinat en el temps. Amb els sistemes de referència es situen els elements geogràfics pel que fa a La Terra.

GML2 és un llenguatge molt ric, tant que en molts casos es poden construir i manipular tipus de documents sense necessitat d'utilitzar bona part de les construccions del llenguatge. En aquest cas es poden definir perfils de GML2 que corresponen a una combinació d'elements útils per a un domini de treball específic. Les regles per a definir perfils en GML2 garanteixen que un arxiu vàlid en un perfil determinat és també vàlid com document GML2.

Idrisi32

Idrisi32 és un sistema d'informació geogràfica fonamentalment raster, ja que els anàlisi es realitzen amb aquest model. Es possible incorporar informació vectorial però aquest probablement (en funció del problema) l'acabarà transformant a raster o l'emprarà com a capa per a superposar els arxius raster.

Idrisi32 es basa en dos tipus de fitxers: dades i metadades. Els fitxers de dades contenen la tupla coordenada – valor d'atribut, mentre que els fitxers de metadades, per la seva banda, són la informació sobre les pròpies dades (nom, origen, qualitat, precisió, etc), també són anomenades “documentació dels fitxers de dades”.

Dades i metadades són emmagatzemades en un fitxer individual cadascuna, amb el mateix nom però amb diferents extensions.

Els fitxers Idrisi32 de dades Raster tenen una estructura molt simple: consisteixen en una llista seqüencial de valors (columna de valors). La documentació del fitxer emmagatzema el nombre de columnes i files, per a que el software pugui representar-ho en forma de taula bidimensional. Els valors de cel·la estan disposats de manera que el primer valor pertany a la cel·la superior esquerra i l'últim a la cel·la inferior dreta. El fitxer de documentació conté la informació de les dades i de com s'han de representar

En quant al model vectorial, IDRISI32 utilitza fitxers de vectors d'atributs. Contràriament a les estructures tipus *Spaghetti*, reconeix vectors d'atributs o objectes (punts, línies i polígons), però, en contrast a d'altres sistemes com Arc/Info o Cartalinx, no reconeix informació topològica (Connectivitat o veïnatge d'atributs). En altres paraules, els atributs són reconeguts, però l'anàlisi espacial és limitat.

Punts, línies i polígons han d'estar en fitxers diferents. Els atributs poden ser embeguts (assignats a punts i emmagatzemats en el propi vector) o poden ser emmagatzemats externament en una taula i enllaçats mitjançant identificadors emmagatzemats en el propi vector)

Per fitxers de punts, cal especificar el nombre de punts en el fitxer, i aleshores afegir els identificadors i coordenades de cada punt.

Per fitxers de línies, cal especificar el nombre de línies en el fitxer i aleshores, per cada línia, afegir el seu identificador i les coordenades de cada punt inclòs en la línia.

Per fitxers de polígons, cal especificar el nombre de polígons, i aleshores, per cada polígon, afegir el seu identificador i les coordenades de cada punt que forma un polígon. La primera i última coordenada ha de ser la mateixa.

2.5. Autòmats cel·lulars

2.5.1. Introducció

El modelatge de la majoria de sistemes físics, elèctrics i mecànics està basat en mètodes i expressions matemàtiques, les quals representen teòricament el comportament d'aquests sistemes. Generalment, per a modelar sistemes de naturalesa contínua, són utilitzades les equacions diferencials, les integrals funcionals i les variables d'estat, entre d'altres. Alguns procediments de discretització i digitalització de sistemes permeten realitzar anàlisis numèriques sobre models aproximats.

Una tècnica matemàtica complexa utilitzada per a modelar alguns sistemes físics i mecànics és el Mètode dels Elements Finites (FEM), la finalitat dels quals és discretitzar espais de naturalesa contínua, sobre els quals és possible realitzar anàlisis numèriques per a comprendre, per mitjà d'un model discret, el comportament de sistemes analògics. No obstant això, la complexitat d'aplicar FEM sobre alguns sistemes és tal, que resulta difícil assolir models que descriguin amb precisió els seus comportaments. FEM és d'àmplia utilització en anàlisi de sistemes i espais físic-mecànics on l'objectiu sigui comprendre la resistència de materials, la dinàmica de partícules i en general el comportament i la interacció dels elements base del sistema en l'espai; però queden encara molts sistemes complexos i de diversa naturalesa en els quals no és convencional aplicar aquesta tècnica, per exemple, sistemes químics, biològics, evolutius, genètics, elèctrics, computacionals i inclusivament altres físics i mecànics. Per al modelatge d'aquest tipus de sistemes queden encara tres opcions: Assolir un model de naturalesa contínua (en aquells sistemes analògics), en el qual es requereix expressions de funcions contínues; utilitzar mètodes aproximatius de discretització (no obstant, es tenen problemes de digitalització del model) o modelar amb un Autòmat Cel·lular.

Els Autòmats Cel·lulars són estructures ideals per a construir models digitals aproximatius d'alguns sistemes complexos de naturalesa contínua, sense passar per models analògics. És possible, per exemple, assolir senzills models digitals que representin amb suma fidelitat algunes lleis de la física.

2.5.2. Història

Els AC s'han 'inventat' en nombroses ocasions amb diferents noms i freqüentment diferents conceptes s'han utilitzat amb el mateix nom.

Els AC van ser introduïts a la fi dels anys 40 per John von Neumann seguint un suggeriment de Stanislav Ulam amb l'objectiu de crear un model real del comportament de sistemes complexos. En un AC els objectes que poden ser interpretats com dades passives i els quals fan la funció de dispositius de computació es troben al mateix nivell i sotmesos a les mateixes lleis; computació i construcció són simplement dos models d'activitat de manera contrària als models convencionals de computació tals com la màquina de Turing que fan una distinció clara entre l'estructura de l'ordinador (que és fixa) i les dades sobre els quals l'ordinador treballa (que són variables). L'ordinador no pot operar sobre la seva pròpia estructura, no pot modificar-se a si mateix ni construir altres ordinadors. Tot i que von Neumann era un físic i matemàtic excepcional, en el seu treball original hi ha una manca de consideracions físiques; el seu interès estava dirigit principalment a donar una explicació reduccionista de certs aspectes de la biologia. De fet els mecanismes que va proposar per a arribar a estructures autoreplicants, com es va descobrir posteriorment, s'assemblen bastant als que empren els organismes vius. De forma paral·lela a von Neumann l'enginyer alemany Konrad Zuse va desenvolupar el concepte d'AC. Zuse estava interessat en la construcció de models digitals de la Mecànica i els conceptes físics tenen un paper preponderant, no obstant això els seus treballs no van tenir tant impacte com els de von Neumann.

En els anys 60 John Holland va començar a aplicar els AC en problemes d'optimització i adaptació. A la vegada un gran nombre de matemàtics dirigirien la seva atenció cap a les transformacions iteratives que actuen sobre estructures espacialment extenses i amb un conjunt discret d'estats. Qüestions importants sobre computabilitat i reversibilitat s'han estudiat per Alvy Smith, Serafino Amorós i Victor Aladyev.

El joc de la vida de John Conway que va aconseguir una gran popularitat gràcies a Martin Gardner es va convertir en un objecte de culte per a una generació de joves científics en els anys 70.

La qüestió de si els AC poden modelar només aspectes fenomenològics o si en canvi poden servir per a modelar les pròpies lleis Físiques va ser estudiada per Edward Fredkin i Tommaso Toffoli en els anys 80. El tema principal de la seva investigació és la formulació de que els models computacionals de problemes físics conserven la informació, retenint un dels ingredients principals de la física microscòpica que és el seu caràcter reversible.

Des del punt de vista de la Física i la Química l'estudi de models que redueixen fenòmens macroscòpics a processos microscòpics perfectament definits són d'un interès metodològic fonamental. Els simuladors d'AC són capaçs d'actualitzar milions de cel·les en un temps extremadament curt i són una eina ideal en la construcció de models simples d'equacions diferencials com les equacions de la calor, de propagació d'ones o de Navier-Stoke. En particular els models d'AC s'utilitzen de forma regular en dinàmica de fluids. Finalment per a una de les branques de la Física que més s'està desenvolupant com és la dels sistemes dinàmics, l'aparició de fenòmens col·lectius, la turbulència, el caos o la fractalitat, els AC donen una rica i creixent col·lecció de models representatius d'aquests fenòmens, que poden ser aïllats i estudiats de forma senzilla. L'ús sistemàtic dels AC en aquest camp va ser iniciat per Stephen Wolfram a mitjans dels anys 80.

En conclusió podem dir que els AC han trobat un paper permanent com models conceptuals i pràctics de sistemes dinàmics espacialment distribuïts, dels quals els sistemes físics són els principals prototips. En l'actualitat, des de fa aproximadament una dècada, on el desenvolupament de models amb AC està mostrant més activitat és en el marc de la simulació urbanística: simulació de tràfic, usos del sòl, desenvolupament urbà, entre d'altres; i en la recerca de vida artificial[].

2.5.3. Definicions

El concepte d'Autòmat Cel·lular és extremadament simple: suposem una retícula, graella o, més matemàticament, lattice, on cada cel·la d'aquesta conté un valor o estat. En cada instant de temps cada cel·la analitza el valor de les cel·les d'un entorn al seu al voltant i segons una determinada regla local canvia, o no, el seu estat. A més de l'actualització síncrona de totes les cel·les que constitueixen el sistema, les característiques principals d'un AC són que tant l'espai com el temps són quantitats discretes. Un AC és per tant un sistema dinàmic discret.

Segons els plantejaments de Muñoz Castaño [5], els components bàsics d'un autòmat cel·lular són els següents:

- Un espai n -dimensional o lattice dividit en un nombre de subespais homogenis, coneguts com a cel·les o cèl·lules, anomenat **Tesselació Homogènia**.
- Cada cel·la pot estar en un **estat**, el qual forma part d'un conjunt finit o numerable d'estats.
- Una **Configuració C**, la qual consisteix en assignar-li un estat a cada cel·la de l'autòmat.

- Un **Veïnatge** definit per a cada cel·la, el qual consisteix en un conjunt contigu de cel·les, indicant les seves posicions relatives respecte a la cel·la mateixa.
- Una **Regla d'Evolució**, la qual defineix com canvia cada cel·la d'estat, depenent de l'estat immediatament anterior del seu veïnatge.
- Un **Rellotge Virtual de Càmput** connectat a cada cel·la de l'autòmat, el qual generarà *tics* o polsos simultanis a totes les cel·les indicant que ha d'aplicar-se la regla d'evolució.

Segons Toffoli i Margolus [6], es defineix un AC només si totes les cel·les:

- Tenen el mateix **Conjunt d'Estats** S possibles.
- Tenen la mateixa forma de **Veïnatge**.
- Tenen la mateixa **Regla d'Evolució**.

ESTAT

$x_i(t)$: representa l'estat de la cel·la que ocupa la posició i en l'instant t . El nombre total de cel·les el representarem per N . El conjunt $\{k\}$ de possibles estats ha de ser finit, $x_i(t) \in \{k\}$.

VEÏNATGE

$V_i(t) = \{x_i(t), x_{i+1}(t), x_{i-1}(t), \dots\}$ és el conjunt de cel·les adjacents a la cel·la i i la pròpia cel·la i . El nombre de veïns el representem per N_v . Per $d=1$ (una dimensió) i prenent els veïns com el de la esquerra i el de la dreta tindríem el següent veïnatge: L-C-R (Esquerre-Centre-Dret)

En aquest exemple estem considerant un veïnatge de radi $r=1$. Si estenem el radi a $r=2$, tindríem el següent tipus de veïnatge: LL-L-C-R-RR

Per $d=1$ el nombre de veïns és: $2r + 1$ i el nombre de possibles veïnatges és k^{2r+1} .

En un AC les N cel·les es troben en una lattice de dimensió d . Quan la lattice és de grandària finita podem considerar condicions de contorn periòdiques, és a dir que la cel·la en la posició 0 té com a veïna a la cel·la de la posició N i viceversa.

Per $d=2$ (dues dimensions) hi ha dos tipus fonamentals de veïnatge:

- a) El Veïnatge de Von Neumann, que consisteix en la cel·la central més els quatre veïns més pròxims:

| | | |
|---|---|---|
| | N | |
| O | C | E |
| | S | |

Figura 2.11 – Veïnatge de Von Neumann

- b) El Veïnatge de Moore, que consisteix en 9 cel·les: la cel·la central més els veïns més pròxims i els següents.

| | | |
|----|---|----|
| NO | N | NE |
| O | C | E |
| SO | S | SE |

Figura 2.12 – Veïnatge de Moore

REGLES

La regla d'evolució $R = f(V_i(t))$ ens permet obtenir el valor $x_i(t+1)$ quan coneixem el valor de les cel·les en el veïnatge en l'instant anterior. Per exemple en el cas d'un AC binari en $d=1$ amb $r=1$ el veïnatge d'una cel·la ha de ser alguna de les configuracions següents: **111 – 110 – 101 – 100 – 011 – 010 – 001 – 000**

En la següent taula observem que la segona línia ens indica quin serà el valor de la cel·la central en l'instant de temps següent. La regla d'evolució podria ser escrita com: **0 – 1 – 0 – 1 – 1 – 0 – 1 – 0**

| Veïnatge | 111 | 110 | 101 | 100 | 011 | 010 | 001 | 000 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Bit de sortida | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |

Taula 2.4 – Veïnatge $r=1$ d'un AC binari i un exemple de regla d'evolució

D'aquesta manera podem codificar cada regla d'una manera senzilla:

Expressió 2.4 – Codificació d'una regla [7]

$$R = \alpha_7 - \alpha_6 - \alpha_5 - \alpha_4 - \alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1 - \alpha_0$$

On α_i pot valer 0 o 1. El codi numèric d'una regla serà llavors:

Expressió 2.5 – Codi numèric d'una regla [7]

$$R = 2^0 \cdot \alpha_0 + 2^1 \cdot \alpha_1 + 2^2 \cdot \alpha_2 + \dots + 2^7 \cdot \alpha_7 = \sum_{i=0}^7 2^i \cdot \alpha_i$$

En el següent exemple tenim la regla el codi de la qual és 90:

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t=0$ | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| $t=1$ | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Taula 2.5 – Evolució d'una lattice (fr. Periòdica). Regla 90 $r=1$

En la següent figura veiem l'evolució en un diagrama espai-temps de la mateixa regla partint d'un estat inicial en el que tan sols hi ha una cel·la en estat 1 i la resta en estat 0.

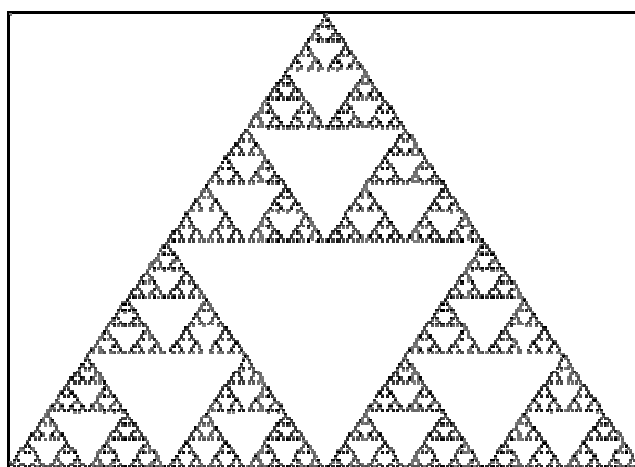


Figura 2.13 – Diagrama espai-temps de la Regla 90 $r=1$

El temps el trobem en direcció vertical (des de dalt cap avall) i en direcció horitzontal es troben els valors de les cel·les. L'estat inicial només compta amb la cel·la central en l'estat 1 i la resta en 0. Les cel·les en estat 1 apareixen en negre i les que estan en estat 0 apareixen en blanc. Hi ha una clara estructura fractal.

PROPIETATS GLOBALS

Organització: partint d'un estat inicial en el qual es trobin totes les configuracions possibles, l'AC evoluciona reduint el nombre de configuracions finals. Hi ha una disminució del *desordre* i per tant una disminució d'*entropia*.

Irreversibilitat Local: En un AC diferents situacions inicials poden donar lloc a la mateixa situació final. És a dir que *pares* distints donen lloc al mateix *fill*. D'aquesta manera coneixent només al fill és impossible saber qui és el pare, no és possible, generalment, tornar cap a enrere en el temps i reconstruir la història completa.

Jardins de l'Eden: Situacions que només es donen com configuració inicial.

UNIVERSALITAT EN AC

Segons S. Wolfram el comportament espai-temporal dels AC és pot classificar en 4 grups:

- Classe I: Estat final homogeni: totes les cel·les en estat 0 o 1.
- Classe II: Estat final format per un conjunt d'estructures estables o periòdiques.
- Classe III: Estat final caòtic.
- Classe IV: Apareixen estructures localitzades i complexes que perduren al llarg del temps.

CONDICIONS DE FRONTERA

Per definició, un AC consisteix en una lattice infinita de valors. No obstant, per qüestions pràctiques (models de sistemes físics portats a terme en ordinadors de memòria finita), es requereix prendre certes consideracions a l'hora d'implementar un AC en un sistema de còmput. És per això que la definició original es modifica per a donar cabuda a lattices finites. Això comporta a la consideració extra del que ha de succeir amb aquelles cel·les que es trobin en les vores de la lattice. A la implementació d'una o diverses consideracions específiques se li coneix com condició de frontera.

Dins de l'àmbit dels AC, es poden implementar nombroses condicions de frontera, d'acord al que el problema real requereixi per al seu modelatge:

- Frontera oberta. Es considera que fora de la lattice resideixen cel·les, totes amb un valor fix. En el cas d'AC amb dos estats en el seu conjunt k , una frontera es diu freda si les cel·les fora de la frontera es consideren d'estat 0 i calenta si es consideren 1.
- Frontera periòdica. Es considera a la lattice com si els seus extrems es toquessin. En una lattice de dimensió 1, això pot visualitzar-se en dues dimensions com una circumferència. En dimensió 2, la lattice podria visualitzar-se en tres dimensions com un toroide.
- Frontera reflectora. És considera que les cèl·lules fora de la lattice reflecteixen els valors d'aquelles de dintre de la lattice. Així, una cèl·lula que estigués al costat de fora de la vora de la lattice prendria com valor el de la cel·la que està al costat de dins de la vora de la lattice.
- Sense frontera. Fent ús d'implementacions que facin créixer dinàmicament l'ús de memòria de la lattice implementada, es pot assumir que cada vegada que les cel·les han d'interactuar amb cel·les fora de la lattice, aquesta es fa més gran per a donar cabuda a aquestes interaccions. Òbviament, existeix un límit imposat per la memòria disponible per a aquesta condició. És molt important no confondre aquesta condició de frontera amb la definició original d'AC, que la seva lattice és

inicialment infinita. En el cas d'un AC sense frontera, la lattice comença amb una grandària definida i finita, i conforme es requereixi va creixent en el temps, la qual cosa no ho fa necessàriament un model més proper a la realitat, doncs si s'inicialitzés la lattice aleatòriament, amb aquesta condició només es poden inicialitzar les cel·les dins de la lattice inicial finita, mentre que en el cas de la definició original, en teoria totes les cèl·lules de la lattice infinita haurien de ser inicialitzades.

2.5.4. Exemples i aplicacions

És típic d'un Autòmat Cel·lular generar comportaments complexos a partir de regles molt senzilles. Són útils en la construcció de models on els elements base o components (actors) són de similar naturalesa i comportament; on aquests es regeixen per regles semblants i on, en el mateix sistema real, s'identifiquen components diferenciables, independents, aïllables i/o discrets.

Tal vegada, el més interessant dels Autòmats Cel·lulars és el comportament presentat pel model en temps d'execució i la similitud d'aquest amb la complexitat de la naturalesa contínua. "Life" o "El Joc de la Vida" (de John Hourton Conway), per exemple, simula l'existència de diferents "formes de vida" sobre un espai bidimensional, les quals presenten singular comportament a través del temps; "Evolució" (de A.K. Dewdney) és un autòmat que simula com un conjunt de microbis sobreviuen menjant bacteris; i "Majoria Alineada" (també de A.K. Dewdney) mostra com és el comportament de la tensió superficial entre líquids no permeables.

El modelar un sistema del món real per mitjà d'un Autòmat Cel·lular, requereix que es conegui almenys el seu comportament global. Si conegut aquest comportament es vol deduir un conjunt de regles d'evolució local que ho generi, llavors es desitja desenvolupar l'autòmat pel problema Invers. En cas contrari, si es desitja primer experimentar i ajustar una Regla d'evolució pseudo-aleatòria fins a assolir un comportament similar al del sistema real, llavors es desitja desenvolupar l'autòmat pel problema Directe. No obstant això, es pot assolir quelcom intermedi, a partir de comportaments locals del sistema real construint una regla d'evolució local i posar-la a prova per a determinar si s'assoleix un autòmat que modela el comportament del sistema global, a això se l'anomena Problema Intermedi.

Depenent de la naturalesa complexa d'un sistema i de la possibilitat d'identificar estats locals i regles generals d'evolució, es podrien simular comportaments per mitjà d'autòmats cel·lulars; per exemple, els mons i sistemes enunciats a continuació són susceptibles a un modelatge per aquesta tècnica: Simulació de tràfic, virus, glòbuls,

epidèmies, bacteris, contaminació, ecosistemes, fluxos de masses, evolució galàctica, flux d'electrons, acció/reacció i gasos de Fermi, entre d'altres.

"El Joc de la Vida"

| | |
|--------------------------|---|
| Tesselació: | Quadrícula homogènia. |
| | Quatre estats: |
| | - <i>Viu</i> (negre) |
| Estats: | - <i>Mort</i> (blanc) |
| | - <i>Viu "recent"</i> (gris fosc) |
| | - <i>Mort "recent"</i> (gris clar) |
| Estat Inicial: | Configuració aleatòria. |
| Veïnatge: | Quadrícula de 3x3 centrat en una cel·la. Inclou la cel·la del centre. |
| | - Una cel·la viva roman viva només si en el seu veïnatge hi ha 2 o 3 cel·les vives, en cas contrari es mor. |
| Regla d'Evolució: | - Una cel·la morta canvia a viva només si en el seu veïnatge hi ha exactament 3 cel·les vives, en cas contrari segueix morta. |

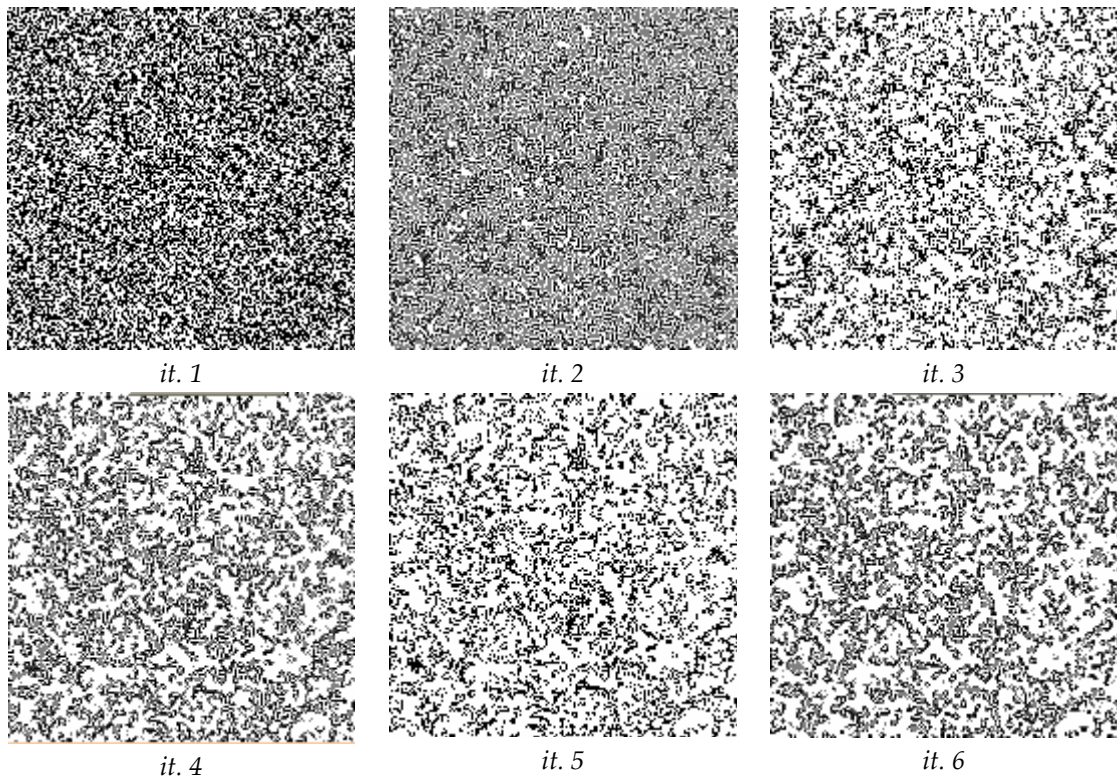


Figura 2.14 – Evolució de l'AC "El Joc de la Vida"

"Majoria Alineada"

Tesselació: Quadrícula homogènia.

Quatre estats:

- *Viu* (negre)
- Estats:** - *Mort* (blanc)
- *Viu "recent"* (gris fosc)
- *Mort "recent"* (gris clar)

Estat Inicial: Configuració aleatòria.

Veïnatge: Quadrícula de 3x3 centrat en una cel·la. Inclou la cel·la del centre.

- Si en un veïnatge la majoria de cel·les estan vives, aleshores la cel·la del centre estarà viva; excepte per exactament 5 cel·les vives, si és així, aleshores estarà morta.

Regla

- d'Evolució:** - Si en un veïnatge la majoria de cel·les estan mortes, aleshores la cel·la del centre estarà morta; excepte per a 4 cel·les mortes, si es així, aleshores estarà viva.

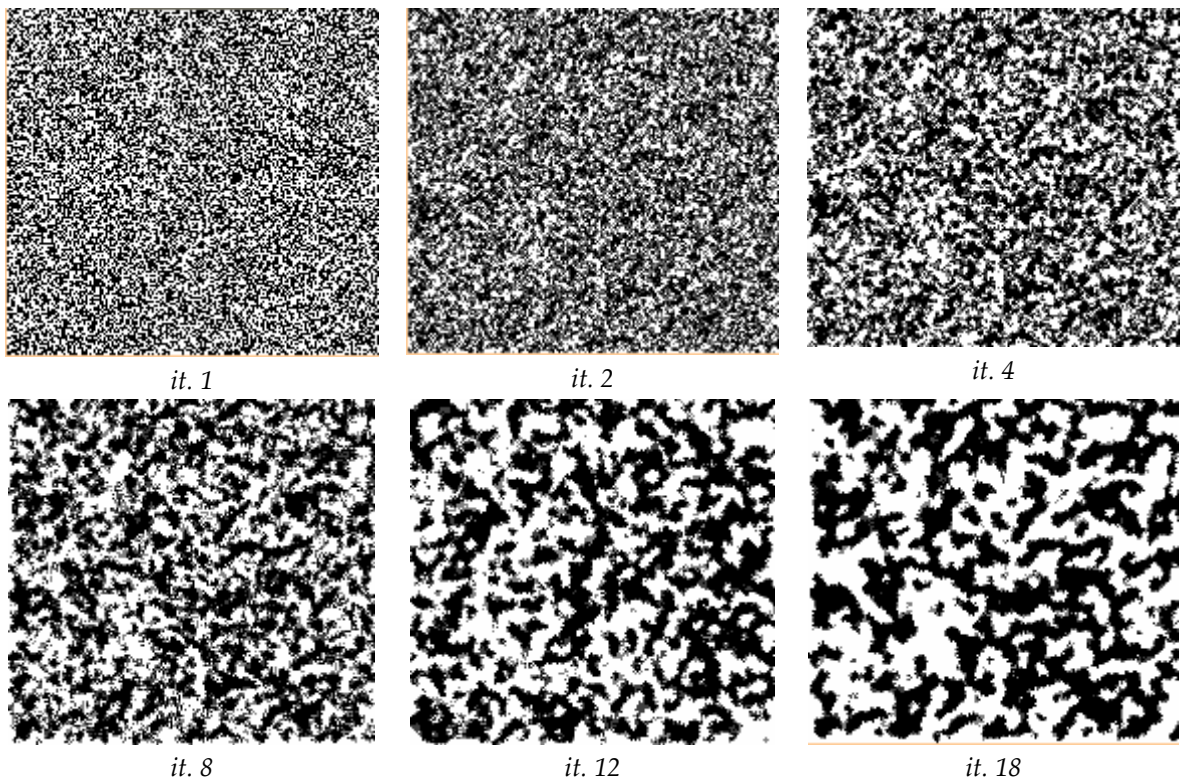


Figura 2.15 – Evolució de l'AC "Majoria Aliniada"

2.5.5. Un model de referència: Na-Sch

El primer exemple complet del que s'ha disposat en la fase d'investigació i que ha servit de referència, junt a d'altres, per al desenvolupament del nostre model va ser l'anomenat model de Na-Sch. És per això que l'incloem en aquesta secció, tant per reforçar la comprensió de la teoria dels autòmats cel·lulars, com la metodologia emprada en el model desenvolupat.

El model de Nagel i Schreckenberg (Na-Sch) és un model de flux de tràfic de vehicles amb un autòmat cel·lular probabilístic, és a dir, és un model d'espai i temps discrets, on cada cel·la de l'autòmat equival ja sigui a un vehicle en moviment amb certa velocitat v o a un espai buit de l'avinguda on es troben els vehicles.

El model Na-Sch original serveix per modelar autopistes d'un carril (ja siguin obertes o en circuit) amb vehicles homogenis. Creat el 1992 pels científics Kai Nagel i Michael Schreckenberg, el model Na-Sch s'ha convertit en la base de molts altres models discrets ja siguin de tràfic vehicular com d'altres matèries, donada la seva senzillesa. No obstant això és capaç de modelar adequadament els fenòmens de congestions de carreteres i autopistes. Això succeeix ja que les gràfiques de densitat de tràfic vs. flux de tràfic són molt similars a les observades empíricament en diverses avingudes reals. A més, una simulació d'aquest model permet observar les ones de tràfic comuns en el flux de vehicles.

Paràmetres

Abans d'introduir les regles del AC, s'esmenten els paràmetres relatius al model:

- Cada vehicle té associada una posició x en l'autopista. Al ser un AC un espai discret, cada cel·la equival a un vehicle o a una cèl·lula buida. Per convenció, la posició és creixent, a partir d'un índex 0.
- Cada vehicle té una velocitat v associada, que és un valor sencer, tal que:

Expressió 2.6 – Velocitat (Model Na-Sch)

$$v \in \{0, 1, \dots, v_{max}\}$$

- v_{max} és la velocitat màxima a la que pot arribar qualsevol dels vehicles.
- p és la probabilitat de que un vehicle redueixi la seva velocitat aleatòriament. Si $p = 0$, el model es coneix com Na-Sch Determinista, en cas contrari es coneix com Na-Sch No Determinista. Aquesta probabilitat pot veure's com la causant de congestions aleatòries en un flux de tràfic normal, causat en la realitat per alguna

causa arbitrària (com una distracció del conductor abans de començar a accelerar).

- b és l'anomenada *bretxa*, que és la distància en cel·les que separa a un vehicle del seu predecessor (el vehicle immediatament endavant seu).

Ha d'aclarir-se que la velocitat està donada en *cel·les per unitat de temps*, i al tractar-se d'un autòmat cel·lular (discret), el temps corre en unitats, pel que parlar d'una velocitat n equival a dir que un vehicle és mourà n cel·les cap endavant en un pas de temps.

Regles

El model Na-Sch consta de 4 regles per a modelar el comportament d'un vehicle qualsevol en l'autopista. Aquestes regles es refereixen a l'acceleració, frenada i moviment dels vehicles:

- Regla 1. Acceleració: $v = \min(v + 1, v_{\max})$. És a dir, si encara no s'arriba a la velocitat màxima, accelerar en una unitat.
- Regla 2. Frenada per interacció amb altres vehicles: $v = \min(v, b)$. És a dir, la velocitat serà igual al mínim entre la velocitat calculada en la regla 1 i la bretxa amb el predecessor. Això evitarà que el vehicle impacti amb el predecessor (el modelo Na-Sch original no modela accidents).
- Regla 3. Frenada aleatòria. Amb probabilitat p , $v = \max(v - 1, 0)$. És a dir, amb probabilitat p , si el vehicle encara no està completament detingut, la seva velocitat (la calculada en la regla 2) és redueix en una unitat. Si $p = 0$ (model Na-Sch determinista), aquesta regla mai és porta a terme.
- Regla 4. Moviment. $x = x + v$. És a dir, s'actualitza la posició del vehicle amb la seva nova velocitat v (la calculada en la regla 3).

Consideracions

Al tractar-se d'un AC, ha de recordar-se que aquestes regles s'apliquen a tots els vehicles de manera homogènia i en paral·lel (al mateix temps).

L'autòmat cel·lular del model Na-Sch tindrà una *lattice* unidimensional, amb L cel·les. Els veïnatges estan donats per la interacció dels vehicles i els seus predecessors (les bretxes). Els estats possibles d'un vehicle són els enters entre 0 i v_{\max} . La funció de transició del AC està donada per les 4 regles del model.

El model Na-Sch pot utilitzar un AC amb condicions de frontera ja sigui *periòdiques*, de manera que l'autopista es visualitza com un circuit tancat on el nombre de vehicles N

es conserva) o *obertes*, on els vehicles entren per un extrem i surten per l'altre. El nombre de vehicles pot variar en aquest cas.

Modelatge de la realitat

D'acord als autors del model, un AC que modeli tràfic de vehicles en una autopista amb les regles anteriors servirà per a modelar en la realitat una autopista amb les següents característiques:

- Cel·les de 7,5m de longitud, que equivalen a la grandària dels vehicles, en terme mig, més la seva distància amb els seus predecessors (bretxes) en una congestió.
- Unitats de temps de 1s, per a $v_{max} = 5$.
- Com els vehicles tenen velocitats que són múltiples d'1 cel·la/s, això es correspon amb 27km/h. Per tant, si $v_{max} = 5$, això es correspon amb 135km/h.

Variants

Encara tractant-se d'un model elemental ja que traient-li qualsevol dels seus components, el model ja no reflectiria la realitat, el model Na-Sch únicament serveix per a modelar autopistes congestionades, amb vehicles uniformes i en un únic carril.

Per a modelar altres aspectes del tràfic: varietat de vehicles, múltiples carrils, o fins i tot, altres fenòmens com diferents formes d'interacció entre els vehicles, accidents, creuaments en avingudes, canvis de carril, interacció amb semàfors, entrades en autopistes, etc, es poden utilitzar altres models, o basant-se en el model Na-Sch, modificar-lo per a captar altres realitats que puguin modelar-se.

Avui dia existeixen múltiples models de tràfic de vehicles estretament relacionats i basats en el model Na-Sch amb les seves quatre regles fàcilment reconeixibles.

Alguns dels models derivats del model Na-Sch són els següents:

- Models de múltiples carrils: els quals considera autopistes d'almenys dos carrils i proporcionen regles que permeten el canvi entre carrils dels vehicles.
- Models d'accidents vehiculars: els quals afegixen certes condicions per a simular la presència de les anomenades situacions perilloses que provocarien un accident entre vehicles. Els accidents en realitat no es duen a terme, però sí es marquen per a indicar la presència d'aquestes situacions, que de desenvolupar-se com deurién, causarien de fet un accident.
- Model Knospe, Santen, Schadschneider, Schreckenberg: és un model basat en el Na-Sch que utilitza vehicles de longituds majors a 1 cel·la i que considera efectes

anticipatius per a modelar de manera més realista el tràfic vehicular. Considera l'ús de llums de fre dels vehicles com un mitjà per a millorar la interacció entre els mateixos i així assolir una actitud al conduir molt més suau que la que té el model Na-Sch. Aquests mateixos investigadors han proposat un model multicarril per a aquestes condicions.

3. MODELATGE

3.1. Descripció del model AC d'allaus de placa

El model AC - Allaus de placa és un model de flux d'allaus amb un autòmat cel·lular no probabilístic, és a dir, és un model d'espai i temps discrets, on cada cel·la de l'autòmat equival ja sigui a una parcel·la de terreny que conté una massa de neu de placa estàtica o en moviment o a un parcel·la de terreny sense neu de placa.

3.1.1. Components

Els següents són els components bàsics que conté el model per tal de ser considerat com a model d'autòmat cel·lular segons els plantejaments de Muñoz Castaño [5]:

- L'autòmat consta d'un espai bidimensional dividit en cel·les, o cèl·lules, amb les mateixes característiques.
- Cada cel·la pot estar en un estat, el qual forma part d'un conjunt finit d'estats.
- Una Configuració C , la qual consisteix en assignar-li un estat a cada cel·la de l'autòmat.
- Un Veïnatge definit per a cada cel·la, el qual consisteix en un conjunt contigu de cel·les, indicant les seves posicions relatives respecte a la cel·la mateixa.
- Unes Regles d'Evolució, les quals defineix com canvia cada cel·la d'estat, depenent de l'estat immediatament anterior del seu veïnatge.
- Un Rellotge virtual de còmput connectat a cadascuna de les cel·les, el qual generarà tics o polsos simultanis a totes les cel·les indicant quan han d'aplicar les regles d'evolució.

3.1.2. Consideracions sobre les allaus de placa

Abans de descriure el model, esmentem les principals consideracions que s'han tingut en compte en l'anàlisi del fenomen.

- Una allau de placa es desencadena a partir de la discontinuïtat en la cohesió de la massa neu de forma perpendicular al sentit del vessant. La sortida d'una allau de placa mai serà puntual sinó lineal.
- Degut al pes de la massa de neu, la qual ha perdut una de les seves principals sustentacions, la esclatxa es propaga pels extrems de la línia de fractura inicial paral·lelament al sentit del pendent.

- Iniciat el lliscament de la massa de neu, aquesta mai es dispersa en sentit perpendicular al desplaçament.
- La principal força de resistència al lliscament serà el fregament de la massa en moviment amb la neu subjacent o el sòl. Existiran, en menor grau, unes forces de resistència internes de la neu degut als canvis de cohesió i col·lisions dels blocs.
- En aquest tipus d'allau, la fricció amb l'aire o amb els fluids són irrelevants.

3.1.3. Conceptes bàsics

- Cada massa de neu té associada una posició i en el terreny.
- Al ser un AC un espai discret, cada cel·la equival a una parcel·la de terreny buit o que conté una determinada massa de neu de gruix g en moviment amb una força F . Per convenció, la posició és creixent, a partir d'un índex 0.
- Cada *bloc* de neu té una força de desplaçament F associada, que és un valor real, tal que: $F \in \{R\}$.
- Si una cel·la conté neu de placa i $F = 0$, aleshores és que la massa és estàtica. Si $F > 0$, la massa és dinàmica.
- Tota cel·la amb $F > 0$, emmagatzema de quina direcció (i sentit) li ha arribat la massa de neu desplaçada. Aquesta és decisiva en el càlcul del possible desplaçament de la massa en el següent pas.

3.1.4. Estats

$x_i(t)$: representa l'estat de la cel·la que ocupa la posició i en l'instant t . El nombre total de cel·les que conforma la lattice el representem per N . El conjunt k de possibles és finit.

Expressió 3.1 – Estat d'una cel·la

$$x_i(t) \in \{k\}$$

Definim el conjunt k de possibles estats d'una cel·la com:

Expressió 3.2 – Conjunt d'estats

$$k = \{\text{Buit, Dinàmic, Dinàmic}\}$$

k és un conjunt numerable, d'aquesta forma cada estat té la seva representació numèrica: $k = \{0, 1, 2\}$.

Abans de definir cada estat, cal esmentar que ens referim a neu *movible* a la massa de neu d'una parcel·la de terreny que pot formar part de l'allau, diferenciant-la amb la neu superficial, suficientment cohesionada, que mai podrà formar part del fenomen.

Els 3 possibles estats en que es pot trobar una cel·la són els següents:

- Buit: La cel·la no conté cap gruix de neu *movible*.
- Dinàmic: La cel·la conté massa de neu *movible* que es pot desplaçar a una cel·la veïna en el següent pas, segons les regles d'evolució.
- Estàtic: La cel·la conté massa de neu *movible* que romandrà a la mateixa cel·la en el següent pas.

3.1.5. Veïnatge

Definim el veïnatge d'una cel·la de l'AC d'allaus de placa com el Veïnatge de Moore de radi 1, que consisteix en la pròpia cel·la més les 8 cel·les adjacents a aquesta:

Expressió 3.3 – Veïnatge d'una cel·la

$$V_i(t) = \{x_{i-c-1}(t), x_{i-c}(t), x_{i-c+1}(t), x_{i-1}(t), x_i(t), x_{i+1}(t), x_{i+c-1}(t), x_{i+c}(t), x_{i+c+1}(t)\}$$

On c és el número de columnes de la lattice (en una representació finita de l'espai).

Tanmateix, per qüestions de simplicitat, podem referir-nos al veïnatge d'una cel·la segons els 4 punts cardinals i els seus 4 punts entremitjos:

Expressió 3.4 – Veïnatge d'una cel·la (2)

$$V_i(t) = \{NO, N, NE, O, E, SO, S, SE\} + \{x_i(t)\}$$

| | | |
|----|---|----|
| NO | N | NE |
| O | | E |
| SO | S | SE |

Figura 3.1 – Veïnatge de Moore

3.1.6. Condicions de frontera

Per definició, un AC consisteix en una lattice infinita de valors. Cal modificar la definició original per tal de donar cabuda a lattices finites.

Considerarem que la lattice de l'autòmat té una frontera oberta, on les cel·les de l'altra banda de la frontera són de l'estat *Buit* i ofereixen una *força de resistència* infinita al lliscament de masses de neu, per tant, no podran rebre mai massa de neu de placa i el seu estat sempre serà el mateix. Una cel·la de dins de la frontera que hagi de propagar el desplaçament d'una massa de neu fora d'aquesta haurà d'anular el moviment, donat

que topirà amb aquesta gran resistència i, d'aquesta manera, la massa romandrà estàtica en la cel·la.

3.1.7. Configuració inicial

En la configuració inicial, totes les cel·les contenen les dades SIG que li pertocuen i el seu estat definit. L'estat de les cel·les que tenen el valor de 0 en la capa de gruix seran d'estat *Buit*, mentre que les que tenen un valor positiu seran d'estat *Estàtic*. Les cel·les que tenen un valor positiu en la capa de gruix i que, tanmateix, són assenyalades com a cel·les del trencament inicial seran d'estat *Dinàmic*.

3.1.8. Capes de dades

Tota cel·la contindrà, a més a més de l'estat, una sèrie de dades geogràfiques que seran de vital importància en l'aplicació de les regles d'evolució. Veient-ho de forma conjunta, la lattice o malla és compondrà de diverses capes, de la mateixa extensió que la capa principal (estat).

Cada valor d'una capa en la posició *i* és correspon a un *atribut* de la cel·la en la posició *i*. Una cel·la, doncs, no és més que la unió de totes les capes en un punt determinat del terreny on es pot desenvolupar la simulació.

A continuació, definim cadascuna de les capes de l'AC, descrivint el seu tipus, rang i si són modificables o no durant la simulació. Tanmateix, es defineix com s'obtenen aquestes dades i en quin format s'han d'introduir en l'autòmat.

| 0) Estat (Capa principal) | |
|---------------------------|---|
| Tipus | Raster |
| Descripció | Capa que indica l'estat de la cel·la del terreny. - Buit (0): Sense neu de placa. - Dinàmic (1): Conté neu de placa, que es traslladarà en la següent iteració de la simulació. - Estàtic (2): Conté neu de placa, que romandrà estable, almenys fins la següent iteració de la simulació. |
| Modificabilitat | Durant simulació |
| Obtenció de les dades | Simulació |

| 1) Alçada | |
|-----------------------|---|
| Tipus | Raster |
| Descripció | Capa que representa l'alçada global d'un punt del relleu. |
| Modificabilitat | No |
| Obtenció de les dades | Fitxers SIG |
| Tipus | Real |
| Rang | -10.000 – 8.844,43 (m) |

| 2) Gruix de neu de la placa | |
|------------------------------------|--|
| Tipus | Raster |
| Descripció | Capa que representa l'alçada del gruix de neu que pot ser traslladat durant la simulació de l'allau. |
| Modificabilitat | Durant la simulació |
| Obtenció de les dades | Fitxers SIG |
| Tipus | Real |
| Rang | 0 – 30 (m) |

| 3) Característiques del sòl | |
|------------------------------------|---|
| Tipus | Raster |
| Descripció | Capa que representa el tipus de superfície (Neu, gel, grava, vegetació, etc). Cada tipus de sòl tindrà una coeficient de fricció específic amb la neu de placa. |
| Modificabilitat | No |
| Obtenció de les dades | Fitxers SIG |
| Tipus | Identificador |
| Rang | 0-N (on N són el n ^o màxim de tipus de sòls especificats) |

En la implementació del AC hem definit 9 tipus de sòl:

- 0) Neu pols
- 1) Neu dura
- 2) Gel
- 3) Grava grollera
- 4) Grava fina
- 5) Vegetació suau
- 6) Vegetació mitja
- 7) Vegetació densa
- 8) Aigua

| 4) Densitat de la neu de la placa | |
|-----------------------------------|---|
| Tipus | Raster |
| Descripció | Capa que conté el valor de la densitat de la neu de la placa, si n'hi ha. |
| Modificabilitat | Durant la simulació |
| Obtenció de les dades | Fitxers SIG |
| Tipus | Real |
| Rang | 0 – 2 |

En la implementació del AC el valor de la densitat serà de 0,5 (kg/m³) per tota cel·la que contingui neu de placa per qualsevol instant t.

| 5) Trencament | |
|-----------------------|--|
| Tipus | Vectorial |
| Descripció | Capa que indica on es produeix la fractura de la placa de neu. |
| Modificabilitat | Configuració inicial i durant la simulació |
| Obtenció de les dades | Usuari |

| 6) Camí d'allau | |
|-----------------------|---|
| Tipus | Raster |
| Descripció | Capa que indica si la cel·la ha format part de l'allau. |
| Modificabilitat | Durant la simulació |
| Obtenció de les dades | Simulació |
| Tipus | Booleà |
| Rang | 0 – 1 |

Aquesta capa no té cap efecte en el les regles d'evolució, serà emprada únicament per tasques informatives en la implementació.

| 7..14) Força del moviment (8 capes) | |
|-------------------------------------|--|
| Tipus | Raster |
| Descripció | Capa que indica la força del moviment de la neu de placa, si el seu estat és <i>Dinàmic</i> , en direcció i sentit <i>d</i> . On $d \in \{NO, N, NE, E, SE, S, SO, O\}$ |
| Modificabilitat | Durant la simulació |
| Obtenció de les dades | Simulació |
| Tipus | Real |
| Rang | > 0 |

| 15) Obstacles (0..N capes) | |
|-----------------------------------|---|
| Tipus | Raster |
| Descripció | Capa que indica la presència d'un determinat obstacle en la cel·la. |
| Modificabilitat | Durant simulació |
| Obtenció de les dades | Fitxers SIG |
| Tipus | Booleà |
| Rang | 0 – 1 |

Cada tipus d'obstacle té una resistència i grandària diferents, que afectaran en el càlcul de la força de resistència. En la implementació del AC hem definit 6 tipus d'obstacle:

- 1) *Arbre gran*
- 2) *Arbre petit*
- 3) *Casa/refugi*
- 4) *Mur antiallaus gran*
- 5) *Mur antiallaus petit*
- 6) *Altres*

3.1.9. Regles d'evolució

Donada la naturalesa de l'allau de placa cal fer una diferenciació entre els dos fenòmens que es produeixen: i) al desencadenar-se l'allau i produir-se l'escletxa en sentit horitzontal al vessant, primerament es produeix el fenomen d'extensió d'aquesta escletxa paral·lelament al sentit del vessant, produint-se, tot seguit, el següent fenomen, ii) el lliscament de la massa fracturada vessant avall.

En la simulació de l'allau de placa haurem de tenir en compte aquests fenòmens, dividint-la en dues fases:

- Fase de propagació de la fractura
- Fase de lliscament de la massa

En total tindrem 3 regles o funcions d'evolució. Una variable de control ens permetrà saber en un instant t si ens trobem en la fase de propagació de l'escletxa, on s'aplicarà la regla nº1, o si ens trobem en la fase de lliscament, on s'aplicaran a les cel·les les regles 2 i 3.

Funció d'evolució 1: Propagació de l'escletxa.

En la fase de propagació de la fractura, tota cel·la en estat *Dinàmic* i que el valor de la seva capa *Trencament* sigui 1, propagarà la fractura a la cel·la veïna de menor alçada en estat *Estàtic*, sempre que l'alçada d'aquesta sigui inferior a la de la cel·la origen.

Si és compleix la regla, en el següent pas la cel·la destí passarà a ser d'estat *Dinàmic*. La cel·la origen romandrà en el mateix estat.

Expressió 3.5 – Regla d'evolució 1

Si $x_i(t) = 1$ **i** $trenc_i(t) = 1$
 $destí_i(t) = \{ j \in V_i(t) \mid h_j(t) = \min(h_{i-c-1}(t), h_{i-c}(t), h_{i-c+1}(t), h_{i-1}(t), h_i(t), h_{i+1}(t), h_{i+c-1}(t), x_{i+c}(t), x_{i-c+1}(t)) \}$
 $x_{destí_i}(t+1) = x_i(t)$
 $trenc_i(t) = 0$

Si l'estat de la cel·la i és 1 i el seu valor de *trencament* també és 1, el destí de la propagació serà la cel·la del seu veïnatge V_i que tingui menor h (alçada) si el seu estat x és 2.

Funció d'evolució 2: Inici del moviment.

En fase de lliscament, tota cel·la en estat *Dinàmic*, propagarà la massa de neu que conté, a la seva cel·la veïna de menor alçada sigui quin sigui el seu estat, sempre que la força d'impulsió I sigui major a la de la suma de forces de resistència R .

Expressió 3.6 – Regla d'evolució 2

Si $x_i(t) = 1$
 $destí_i(t) = \{ j \in V_i(t) \mid h_j(t) = \min(h_{i-c-1}(t), h_{i-c}(t), h_{i-c+1}(t), h_{i-1}(t), h_i(t), h_{i+1}(t), h_{i+c-1}(t), x_{i+c}(t), x_{i-c+1}(t)) \}$
si $i = destí_i$
 $x_i(t+1) = 2$
sino
si $F(i, destí_i) > I(i, destí_i)$
 $x_i(t+1) = 0$
 $x_{destí_i}(t+1) = 1$
sino
 $x_i(t+1) = 2$

Si l'estat de la cel·la i és 1, el destí del desplaçament serà la cel·la del seu veïnatge V_i que tingui menor h (alçada). Si el destí és ella mateixa, el seu estat canvia a 2 (Estàtic). Contràriament, es calculen les funcions F i I , que més tard explicarem, i si el resultat d' F és major que I , la cel·la origen canviarà d'estat en el següent pas a 0 (Buit) i la destí a 1 (Dinàmic). En aquest últim cas (quan existeix desplaçament), a part de l'estat, també es *desplacen* diverses dades de les capes SIG: gruix, força i direcció.

Funció d'evolució 3: Lliscament.

En fase de lliscament exceptuant el primer pas, tota cel·la en estat *Dinàmic*, propagarà la massa de neu que conté, a la cel·la veïna segons la seva capa *direcció* o a les adjacents esquerra o dreta d'aquest en la mencionada direcció i sentit (segons el pendent entre aquestes 3 cel·les), sempre que la força d'impulsió I sigui major a la de la suma de forces de resistència R .

Expressió 3.7 – Regla d'evolució 3

```
Si  $x_i(t) = 1$ 
  Si  $h_{dir_{i-1}}(t) > h_{dir_i}(t)$  o  $h_{dir_i}(t) > h_{dir_{i+1}}(t)$ 
     $destí_i(t) = h_{dir_i}(t)$ 
  Sino
    Si  $h_{dir_{i-1}}(t) > h_{dir_i}(t) > h_{dir_{i+1}}(t)$ 
       $destí_i(t) = h_{dir_{i-1}}(t)$ 
    Sino
       $destí_i(t) = h_{dir_{i+1}}(t)$ 

  si  $F(i, destí_i) > I(i, destí_i)$ 
     $x_i(t+1) = 0$ 
     $x_{destí_i}(t+1) = 1$ 
  sino
     $x_i(t+1) = 2$ 
```

Si l'estat de la cel·la i és 1, el destí del desplaçament serà la cel·la veïna que indiqui la seva capa *dir* (direcció) o la cel·la esquerra o dreta d'aquesta segons les següents condicions:

- Si l'alçada de la cel·la central és major a qualsevol de les alçades de les altres dues, llavors el destí final serà la cel·la central.
- Si l'alçada de la cel·la central és major que la cel·la dreta però menor que la esquerra, llavors la cel·la destí serà la cel·la esquerra.
- Si l'alçada de la cel·la central és menor que la cel·la dreta però major que la esquerra, llavors la cel·la destí serà la cel·la dreta.

Trobat el destí, es calculen les funcions F i I i si el resultat d' F és major que I , la cel·la origen canviarà d'estat en el següent pas a 0 (Buit) i la destí a 1 (Dinàmic). En aquest cas, a part de l'estat, també es *desplacen* diverses dades de les capes SIG: gruix, força i direcció. En cas contrari la cel·la origen passa a ser de l'estat *Estàtic*.

3.1.10. Funcions de càlcul

En el càlcul de la força de desplaçament d'un bloc de neu de placa vessant avall intervenen 4 forces: una a favor del vessant i tres en contra. Vegem com es calculen.

Força impulsora (I)

Segons la Segona Llei de Newton, "la força que actua sobre un cos és directament proporcional al producte de la seva massa i la seva acceleració".

Expressió 3.8 – Segona Llei de Newton [2]

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

La massa de la capa de neu de placa d'una cel·la és el volum de neu per la densitat de la neu de placa ($\rho = 0,500$). El volum és l'àrea de la cel·la (coneguda pel sistema i igual per tota cel·la de l'autòmat) pel gruix de la capa de neu.

Expressió 3.9 – Massa d'un bloc de neu [2]

$$\begin{aligned} m &= v \cdot \rho \\ v &= A \cdot h' \\ A &= s^2 \\ m &= s^2 \cdot h' \cdot \rho \\ m &= \frac{1}{2} s^2 \cdot h' \end{aligned}$$

L'acceleració sobre el cos és la força de gravetat, per tant la força que actua sobre el cos és el seu pes. La Força d'Impulsió (F_i), doncs, és el pes del cos pel sinus de l'angle del vessant determinat per la diferencia d'alçades entre la cel·la origen i la cel·la destí.

Expressió 3.10 – Força impulsora [2]

$$\begin{aligned} a &= g = 9,81 \\ w &= 9,81 \cdot m \\ M &= \frac{h_{origen} - h_{desti}}{s} \\ \theta &= \arctan M \cdot \frac{180}{\pi} \\ F_i &= w \cdot \sin \theta \end{aligned}$$

Força de resistència per fregament (R1)

Segons la Tercera Llei de Newton, “per cada força que actua sobre un cos, aquest realitza una força igual però de sentit oposat sobre el cos que l’ha produït”, a aquesta força se l’anomena Força Normal (N) i es sempre perpendicular a la superfície de contacte.

Expressió 3.11 – Força Normal [2]

$$N = w \cdot \cos \theta$$

S’anomena força de fricció a la força que es genera en la superfície de contacte entre dos cossos i que s’oposa al moviment entre ells. Es genera per les microsoldadures entre els punts de contacte, es a dir, perquè les imperfeccions dels cossos *encaixen*.

Existeixen dos tipus de fregament: l’estàtic i el dinàmic. El primer es aquell que impedeix que un objecte iniciï un moviment, el segon és una força de magnitud constant que s’oposa al moviment una vegada que aquest ja ha començat. En la simulació no farem diferenciació entre aquests i emprarem sempre una mitja ponderada entre el coeficient de fregament estàtic i dinàmic.

La magnitud de la força de fregament es pot expressar matemàticament mitjançant la següent expressió:

Expressió 3.12 – Força de resistència per fregament amb el sòl [2]

$$F_{R1} = \mu \cdot N$$

On μ és el coeficient de fregament entre el material de la capa de neu de placa lliscant i el material de la superfície.

Nota: La taula 3.1 i les expressions des de la 3.13 fins la 3.20 són hipòtesis sistèmiques.

| Material subjacent | μ |
|--------------------|-------|
| gel | 0,20 |
| neu dura | 0,40 |
| neu pols | 0,50 |
| vegetació suau | 0,60 |
| vegetació mitja | 0,65 |
| grava fina | 0,70 |
| vegetació densa | 0,80 |
| grava grollera | 0,90 |

Taula 3.1 – Coeficients de fregament

Força de resistència interna (R2)

La segona força de resistència de l'allau és l'anomenada força de resistència per col·lisió o per canvis de cohesió. Hem tractat aquesta resistència com una penalització a la força impulsora.

Expressió 3.13 – Força de resistència interna

$$F_{R2} = F_I - F_I \cdot 0,05$$

Força de resistència per impacte amb obstacles (R3)

Una cel·la pot contenir un conjunt d'obstacles sobre la superfície els quals poden oferir resistència al moviment. Per cada obstacle present en una cel·la es realitzen els següents càlculs.

Expressió 3.14 – Força de resistència per impacte amb 1 obstacle

$$\begin{aligned} prop_i &= \frac{A_{obstacle_i}}{A_{cel·la}} \\ F_{impacte_i} &= (F_I - F_{R1} - F_{R2}) \cdot prop_i \\ F_{Robstacle_i} &= \text{MAX}(y_i - F_{impacte_i}, 0) \end{aligned}$$

On $prop$ representa la proporció de l'obstacle respecte a la grandària de la cel·la i y és el coeficient de resistència que ofereix un tipus d'obstacle.

La força de resistència oferta pels conjunt d'obstacles de la cel·la és el sumatori de les forces de resistència de cada obstacle.

Expressió 3.15 – Força de resistència per impacte amb N obstacles

$$F_{R3} = \sum_{i=1}^n F_{Robstacle_i}$$

Força total

L'increment de força sobre la massa de neu de placa en moviment de la cel·la c en una determinada iteració i serà, doncs, la diferencia entre la força impulsora i les forces de resistència.

Expressió 3.16 – Força total en un instant i

$$\Delta F(c,i) = F_I - F_{R1} - F_{R2} - F_{R3}$$

Aquest increment de força s'afegirà a la força acumulada que portava la massa de la cel·la c al arribar a l'instant i .

Expressió 3.17 – Força total acumulada

$$F(c,i) = \text{MAX}(F(c,i) + \Delta F(c,i), 0)$$

Si la força resultant és positiva, la massa de neu avançarà a la cel·la destí, deixant buida la cel·la origen. Si, per contra, la força resultant és 0, la massa s'aturarà en la cel·la actual.

Canvis de trajectòria

Durant el lliscament d'un bloc k de neu de placa, aquest no sempre lliscarà en la mateixa direcció sinó que s'anirà adaptant a les pendents del vessant. Una desviació de la direcció/sentit de la massa del destí natural es produeix segons unes determinades condicions:

- Canvi de trajectòria cap a l'esquerra:

Expressió 3.18 – Canvi de trajectòria cap a l'esquerra

$$h_e < h_c < h_d$$

- Canvi de trajectòria cap a la dreta:

Expressió 3.19 – Canvi de trajectòria cap a la dreta

$$h_e > h_c > h_d$$

On h és l'alçada d'una cel·la i c representa la cel·la original del destí, e el veí esquerra d'aquesta i d el veí dret respecte el sentit i direcció del moviment.

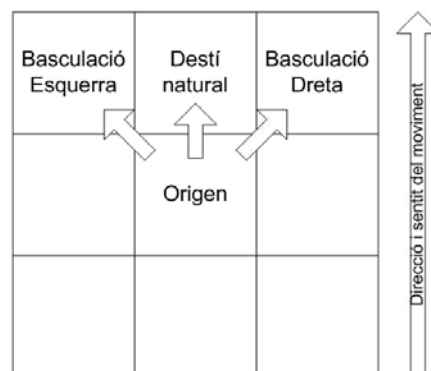


Figura 3.2 – Canvis de trajectòria

Pèrdues de neu

Es pot donar el cas que part de la massa de neu de la placa en moviment es desvinculi del conjunt de l'allau, perdi velocitat i romanguí estable en una de les cel·les del camí mentre l'allau segueix vessant avall. Aquest fet, en la realitat, normalment es dona en la cua de l'allau.

Degut a aquest fenomen, no tot el gruix de la neu de l'allau el trobarem a l'àrea de dipòsit, sinó que en podrem trobar en el propi camí de l'allau.

La pèrdua de neu serà una funció inversament proporcional a la velocitat que porti el conjunt de l'allau: com major força de desplaçament porti l'allau en una cel·la del camí, menor serà el gruix perdut en aquesta, i inversament, com menor força més gran serà el gruix de neu que s'aturi.

Expressió 3.20 – Pèrdua de massa de neu

$$perdua = \frac{h'}{10e^{\frac{F}{a}}}$$

On:

- h' és el gruix de neu original de la cel·la.
- F' és la força acumulada + la força calculada $F(c,i)$.
- A és l'àrea de cel·la del grid.

3.2. Especificació de l'AC

Descriu el model de l'autòmat cel·lular, mitjançant el llenguatge d'especificació SDL modelarem el comportament del conjunt de cel·les i dels components que controlen la simulació.

SDL (Specification and Description Language) és un llenguatge d'especificació formal i visual, formulat per la ITU-T en l'estàndard Z.100, dissenyat per a l'especificació de sistemes complexos, interactius, orientats a esdeveniments, de temps real o que presentin un comportament paral·lel, i on mòduls o entitats independents es comuniquin per mitjà de senyals per a efectuar la seva funció.

Una especificació SDL està formada pels següents elements:

- Estructura (Blocs, Processos, Serveis)
- Comunicacions (Senyals, Canals de comunicació)
- Comportament
- Dades
- Relacions d'herència

Pel modelatge dividirem l'especificació en 8 seccions, utilitzant l'enfocament de dalt cap a baix clàssic de l'enginyeria. Primerament definirem el sistema globalment i després mostrarem l'especificació SDL de l'AC.

- **Sistema (1)**, on definirem globalment els seus components.
- **Blocs (2)**, on explicarem les singularitats dels blocs del sistema i la seva interacció amb els demés.
- **Comunicació (3)**, on comentarem el tipus de comunicacions que s'efectuen entre les instàncies dels blocs del sistema.
- **Diagrama d'estats (4)**, on definirem els estats d'una cel·la i mostrarem el diagrama de transició d'estats.
- **Processos (5, 6, 7)**, on descriurem el comportament individual d'una cel·la segons l'estat en que es troba en un determinat instant de temps.
- **Procediments (8)**, on comentarem els algorismes principals dels que disposa una cel·la.

3.2.1. Sistema

El sistema estarà compost per instàncies de 4 components diferents: AC, motor, rellotge i entorn. Del bloc que constitueix l'AC n'hi hauran N instàncies (cel·les), segons les dimensions i el grau de detall del terreny a simular, mentre que de la resta en disposarem d'una única instància. En el sistema també són indispensables els canals de comunicació, els quals permeten l'intercanvi d'informació entre les instàncies d'un mateix bloc o de blocs diferents.

Les **cel·les** emmagatzemen les dades principals del model. Són estructures amb exactament les mateixes característiques, però que fan referència a diferents punts geogràfics. Aquestes dades emmagatzemaran la informació relativa a una parcel·la del terreny sobre el qual s'ha de realitzar la simulació. Són instàncies individuals i autònomes que emmagatzemen dades i realitzen càlculs per si mateixes, essent la part fonamental del sistema. Les dades d'una cel·la estan distribuïdes en capes tal com és habitual en els Sistemes d'Informació Geogràfica. La capa principal serà l'anomenada capa d'estat que és la que, principalment, dictaminarà el comportament d'una cel·la i el seu veïnatge.

Per una altra banda, tenim el **motor**, l'objectiu del qual és fer de guia durant el procés de simulació des de l'estat inicial a l'estat final. El **rellotge** és el que determina quan ha d'actuar el motor.

L'últim component, l'**entorn**, és el que gestiona la interacció entre l'usuari i el simulador, enviant-li al motor la configuració inicial, indicant-li quan ha d'iniciar la simulació i, finalitzada aquesta, transmetent els resultats a l'usuari.

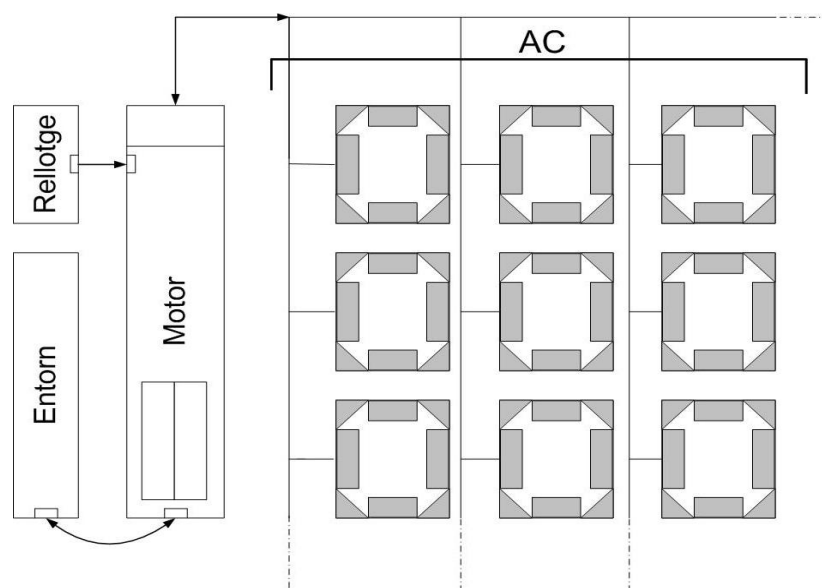


figura 3.3 – Diagrama de sistema

El motor és l'iniciador del procés d'actualització de les dades en un cert instant de temps. En aquest instant enviarà una senyal a les cel·les de l'AC per tal de que actualitzin la seva informació: aquestes realitzaran els càlculs pertinents sobre les seves dades i finalitzat aquest procés, en cas d'haver de modificar la seva informació transmetran una resposta al motor. Quan en un instant determinat, el motor no rebi cap resposta per part de les cel·les la simulació es donarà per finalitzada.

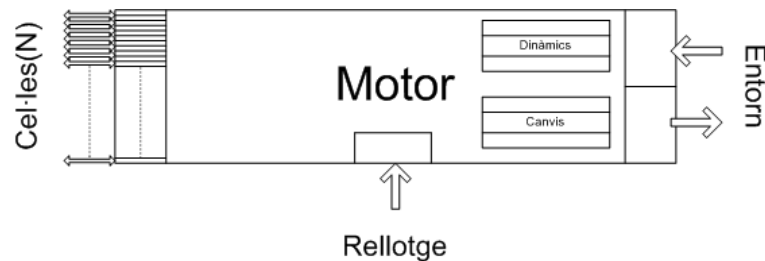


figura 3.5 – Bloc Motor

El motor constarà, doncs, d'un port d'entrada i un de sortida per cadascuna de les cel·les de l'autòmat i d'un port d'entrada per rebre els polsos del rellotge.



figura 3.6 – Bloc Rellotge

Tanmateix, comptarà amb un port d'entrada i un altre de sortida per tal de rebre i respondre les peticions de l'usuari: iniciar, finalitzar la simulació, consultar una determinada cel·la, etc.



figura 3.7 – Bloc Entorn

Per tal d'emmagatzemar la informació rebuda de les cel·les, el motor conté dues estructures de dades per al control de la simulació: la llista de cel·les dinàmiques i la llista de modificacions. Definirem aquestes estructures tot seguit i en veurem el seu funcionament global en el cinquè capítol (Especificació, diagrames de seqüència).

La primera estructura ens permetrà reduir el cost computacional del simulador i la segona controlarà que les actualitzacions sobre el conjunt de dades de les cel·les es

facin al mateix temps. Definim a continuació aquestes estructures i els tipus de dades amb que treballen.

Estructura de dades 'Llista de Dinàmics'

En la implementació del model, que totes les cel·les hagin d'executar les funcions d'evolució pot arribar a ser molt costós. Es per això que emmagatzemant, per cada pas, les cel·les que segons el seu estat sabem que han d'aplicar les funcions d'evolució, reduïrem aquest cost. En escenaris grans aquestes cel·les generalment no representaran més d'un 1% del conjunt de cel·les, fet que justifica la presencia d'aquesta estructura.

A l'inici de cada iteració (cada increment de temps Δt) es genera aquesta llista, fent un recorregut per totes les cel·les del sistema i afegint-ne les que el seu estat sigui *Dinàmic*. La llista consisteix en una seqüència ordenada (descendentment pel valor de l'atribut *alçada*) d'objectes del TAD *Info Dynamics*.

TAD 'Info Dinàmics'

L'única informació que cal emmagatzemar en la Llista de Dinàmics és la següent:

- Coordinada: enter (0.. N)
- Alçada: real

Estructura de dades 'Llista de Canvis'

En el motor hi trobem també l'anomenada *Llista de Canvis*, la qual emmagatzema totes les dades del conjunt de cel·les (excepte l'estat) que, a final del pas de simulació, s'hauran de modificar. La llista consisteix en una seqüència d'objectes del TAD *Info Desplaçament*.

Cada vegada que es computa un desplaçament de neu d'una cel·la origen a una cel·la destí, cal emmagatzemar els resultats en aquesta estructura, per tal de, finalitzats els càlculs de tot el conjunt de les cel·les, poder aplicar totes les modificacions a aquestes a final d'iteració.

TAD 'Info Desplaçament'

La informació que cal emmagatzemar en la llista de canvis és la següent:

- Coordinada: enter (0.. N)
- Alçada: real

- Força: real
- Direcció: enumeració {NO,N,NE,E,SE,S,SO,O}
- Gruix: real
- Gruix_perdut: real
- Origen?: Booleà

Donat que quan s'ha de produir un desplaçament, a final d'iteració, hauran de modificar les seves dades les cel·les origen i destí, per cada desplaçament s'enregistra 2 vegades *Info Desplaçament*, cadascuna amb les dades relatives a cada cel·la.

Per l'origen s'afegiran les quantitats de força i gruixos en negatiu, mentre que pel destí es farà en positiu. El TAD conté una variable (origen?) que indica si la informació pertany a una cel·la origen o a una cel·la destí.

3.2.2. Blocs

A partir d'aquest punt, fins a final de capítol, es mostra l'especificació SDL del model.

El conjunt de cel·les del component AC conformen els blocs del sistema. Aquests consten, estructuralment, de 3 parts: Un mòdul d'emmagatzematge de dades, un altre de càlcul i, finalment, d'un o de diversos ports que permeten l'intercanvi de missatges amb les altres instàncies de l'autòmat. Mitjançant un port de sortida una instància podrà transmetre informació mentre que per un port d'entrada rebrà les dades enviades per una altra instància.

Les instàncies del bloc cel·la, com hem dit, són la part fonamental del sistema: emmagatzemen les dades de la simulació i són les úniques capaces de realitzar modificacions sobre elles durant el transcurs d'aquesta. Per aquesta tasca en tenen suficient en conèixer les seves dades i les del seu veïnatge; no necessiten conèixer la resta del sistema.

Tota cel·la comptarà amb 8 cel·les veïnes (Veïnatge de Moore de radi 1), tal com hem esmentat en la descripció de l'autòmat cel·lular i, per tal d'intercanviar informació amb aquestes, comptarà amb un port d'entrada i un de sortida per cadascuna d'elles.

Les cel·les necessitaran, però, algun mecanisme que les indiqui quan realitzar els càlculs i les modificacions sobre les dades. El rellotge és el que efectua aquesta tasca, així que cada cel·la hi haurà d'estar connectada mitjançant un port d'entrada per tal de rebre els senyals d'aquest.

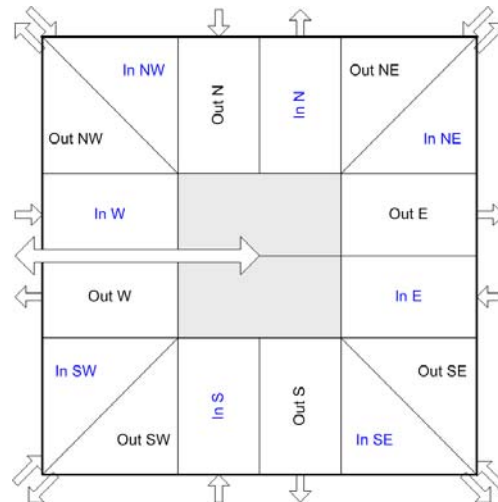


figura 3.4 – Ports d'una cel·la

3.2.3. Comunicació

La comunicació entre cel·les serà primordial en la simulació donada la funció de veïnatge en el model de l'autòmat cel·lular. En el procés de simulació, les cel·les hauran d'intercanviar informació tal com pendents, gruixos o forces en el procés de càlcul de nous estats.

Cada cel·la constarà de 8 cel·les veïnes i, per tant, de 8 canals de comunicació bidireccionals, un per cada veí, tal com s'il·lustra en la figura 3.8.

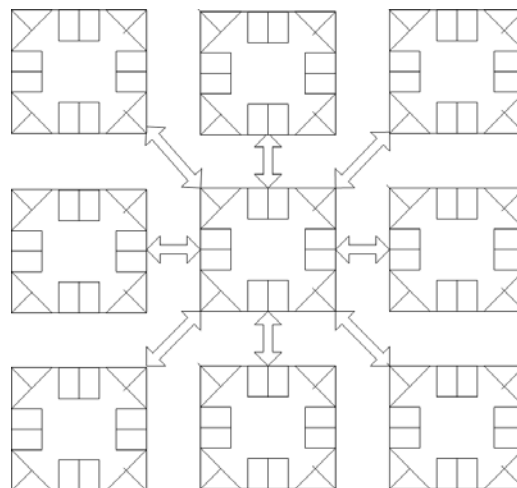


figura 3.8 – Comunicació entre cel·les

Identifiquem aquests 8 canals de comunicació amb les cel·les adjacents mitjançant els 4 punts cardinals geogràfics i els seus punts intermedis {N, NE, E, SE, S, SO, O, NO}.

Missatge 'Consulta d'Informació'

Quan una cel·la vol realitzar una consulta sobre una dada d'una cel·la adjacent, caldrà que la primera li envii el missatge *Consulta Informació* i esperar la resposta de la segona. Aquest missatge consta de dos paràmetres: el primer indica quina és la variable de la que vol el seu valor, mentre que el segon paràmetre serà un camp buit. Quan la cel·la destí rebí el missatge afegirà la dada demanada com a segon paràmetre i retornarà el missatge a la cel·la que l'ha generat.

3.2.4. Diagrama d'estats

Una cel·la emmagatzemarà diverses capes d'informació geogràfica, algunes de les quals poden ser modificades en temps d'execució. No obstant totes aquestes dades dependran de la capa principal. L'estat d'una cel·la és el que determina el comportament que tindrà en cada cicle del rellotge Δt . Un canvi d'estat en una cel·la, en una determinada actualització, es pot produir segons un esdeveniment (senyal enviada d'una cel·la a altra o a si mateixa).

Els 3 possibles estats d'una cel·la, recordem, són els següents:

- Buit: La cel·la no conté cap gruix de neu *movible*.
- Dinàmic: La cel·la conté massa de neu *movible* que es pot desplaçar a una cel·la veïna en la següent actualització del rellotge segons les regles d'evolució.
- Estàtic: La cel·la conté massa de neu *movible* que romandrà a la mateixa cel·la en la següent actualització del rellotge, es a dir, no se li aplicaran les regles d'evolució en la iteració actual.

Expliquem, tot seguit, els diferents esdeveniments i els possibles canvis d'estat que es poden produir en una cel·la. Tanmateix, cal esmentar que la simulació constarà de dues etapes en ordre seqüencial: la fase de propagació de la fractura i la fase de lliscament de la massa. Fins que no acaba la primera no comença la segona.

L'únic tipus d'esdeveniment que canviarà l'estat de les cel·les en la fase de propagació serà l'anomenat *Fracturar*, que serà enviat, primerament a les cel·les que pertanyin a la línia de trencament (configuració inicial de l'AC) i, en successives iteracions, a les cel·les veïnes destí calculades segons la regla d'evolució.

Una cel·la en estat *Estàtic* que rebí un esdeveniment *Fracturar* canviarà a l'estat *Dinàmic*, mentre que si el rep una cel·la en estat *Buit* o *Dinàmic* no tindrà cap efecte i romandrà en el mateix estat.

En la fase de lliscament tindrem tres tipus d'esdeveniment: *Desplaçar*, *Enviar* i *Rebre*. El primer serà enviat a tota cel·la de l'autòmat en estat *Dinàmic* per a que calculi si ha de propagar el lliscament a alguna cel·la del seu veïnatge. L'esdeveniment *Enviar* serà enviat, passada l'etapa de càlculs, a totes les cel·les dinàmiques descartant les que no propaguen el lliscament. Per últim, *Rebre*, serà transmès a les cel·les que en la següent actualització de rellotge rebran massa de neu *movible*.

L'event *Desplaçar* només tindrà efecte en cel·les en estat *Dinàmic*, quan aquestes reben una nova actualització del rellotge. Aquest event pot fer que la cel·la segueixi en aquest estat, per a després rebre un esdeveniment *Enviar*, o passi a ser d'estat *Estàtic*.

Una cel·la en estat *Dinàmic* que rebí un esdeveniment *Enviar* pot canviar, segons les regles d'evolució de la fase de lliscament, a l'estat *Buit* o a *Dinàmic*, però mai romandrà en estat *Estàtic*. Per contra, una cel·la en estat *Buit* o *Estàtic* que rebí *Enviar* no canviarà d'estat.

L' esdeveniment *Rebre* afectarà a totes les cel·les de la mateixa manera, sigui quin sigui el seu estat acabaràn sent d'estat *Dinàmic*.

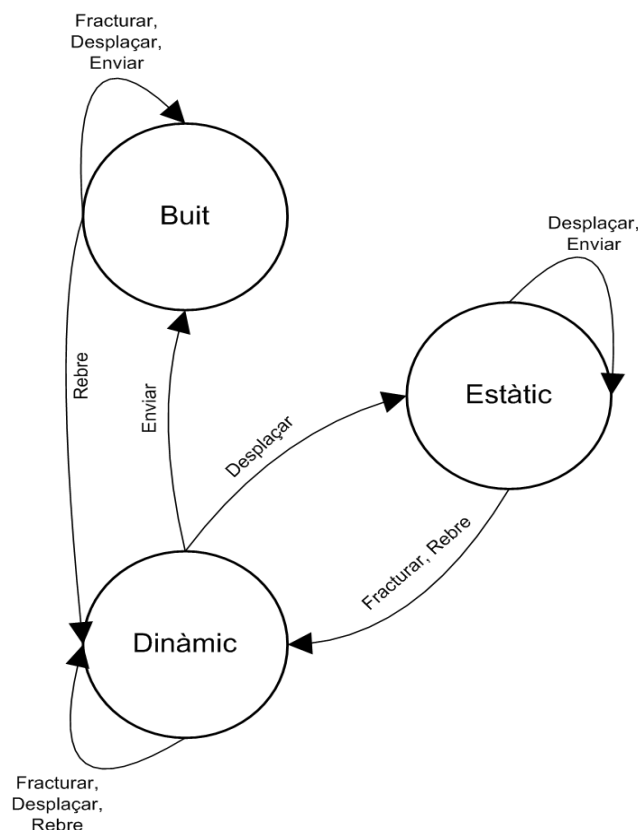


figura 3.9 – Diagrama d'estats

3.2.5. Processos: estat Estàtic

Una cel·la en estat *Estàtic* que rebí un event *Fracturar*, executa el procediment *Calcular Propagació*, en el qual s'aplica la regla d'evolució de la fase trencament. Si aquest procediment retorna una cel·la veïna a la que seguir propagant el trencament, la cel·la li envia un nou esdeveniment *Fracturar* a la cel·la veïna. Finalment, canvia el seu estat a *Dinàmic*.

En el cas que rebí l'event *Enviar* o *Desplaçar* no realitzarà cap acció i romandrà en el mateix estat. En canvi, si rep l'esdeveniment *Rebre* canviarà el seu estat a *Dinàmic* i modificarà la seva informació SIG segons les dades calculades per la cel·la veïna que li ha *enviat* la massa de neu.

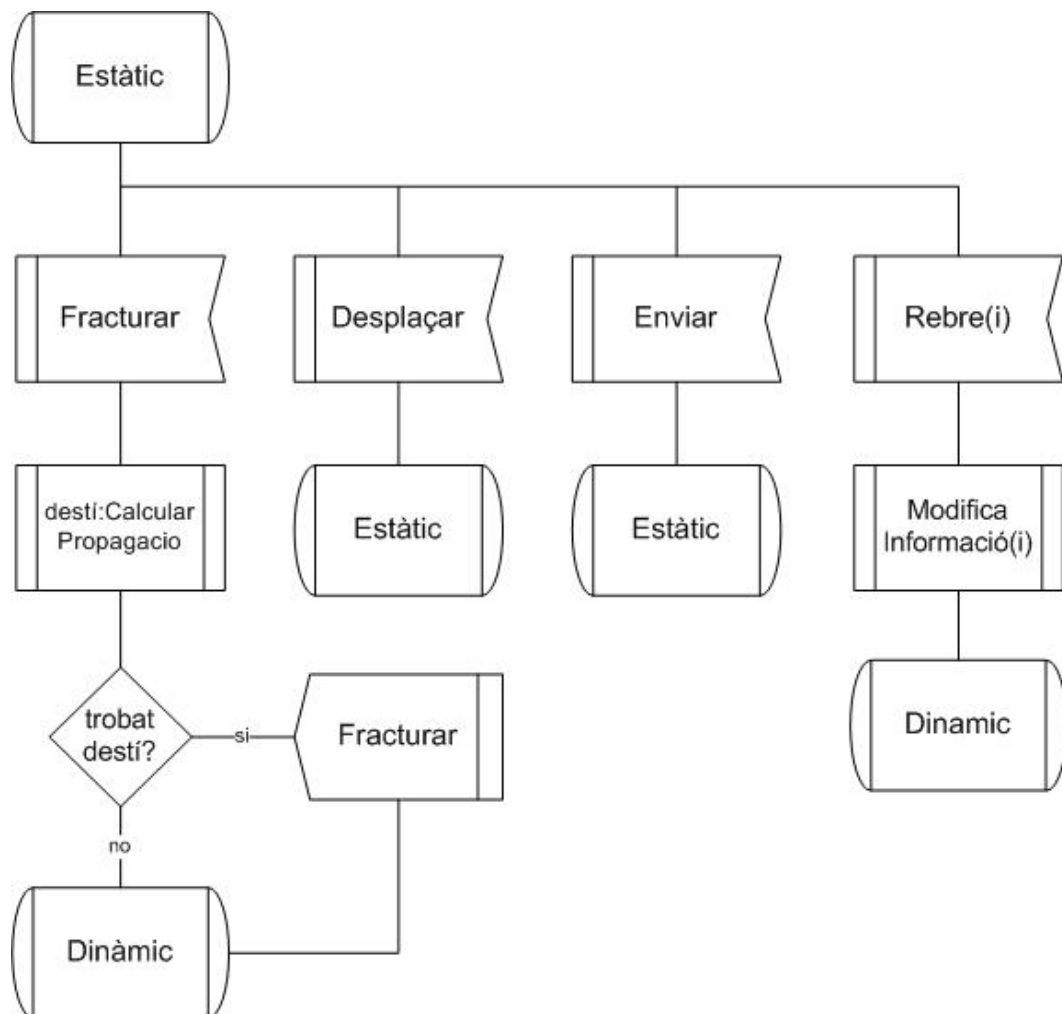


figura 3.10 – Diagrama de procés (Estàtic)

3.2.6. Processos: estat Buit

Una cel·la en estat *Buit* que rebí els esdeveniments *Fracturar*, *Desplaçar* o *Enviar* no realitzaran cap acció i romandrà en el mateix estat. En canvi, si rep l'event *Rebre*, canviarà el seu estat a *Dinàmic* i modificarà la seva informació SIG segons les dades calculades per la cel·la veïna que li ha *enviat* la massa de neu.

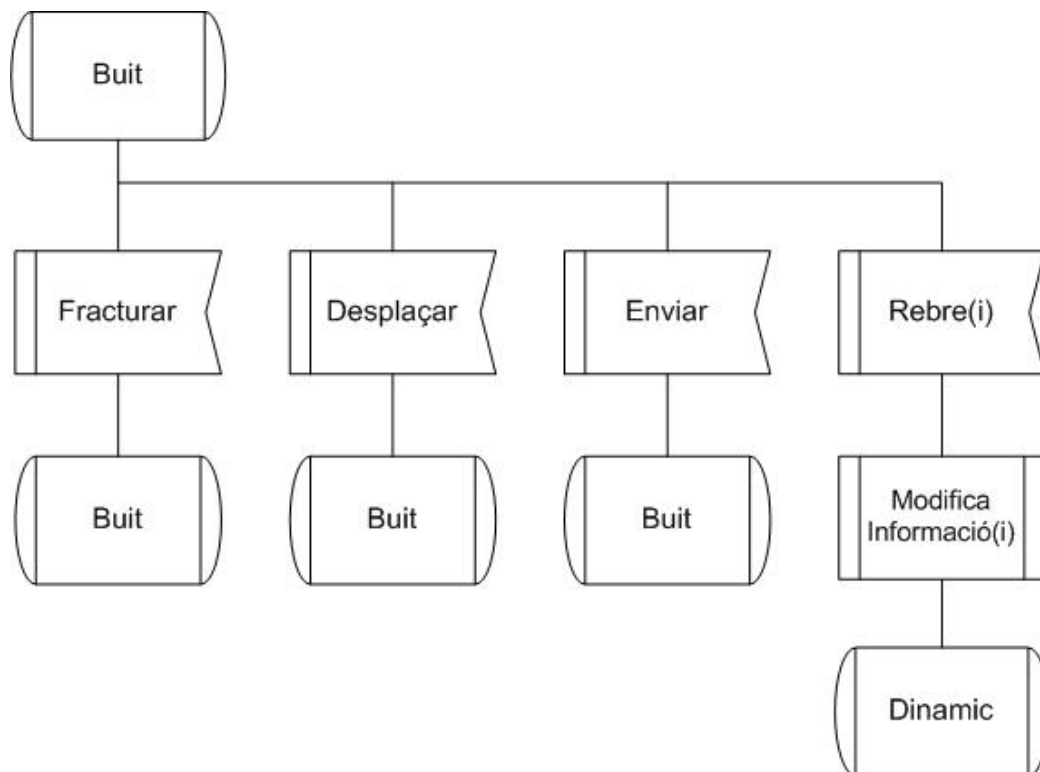


figura 3.11 – Diagrama de procés (Buit)

3.2.7. Processos: estat Dinàmic

Una cel·la en estat *Dinàmic* que rebí *Fracturar* no realitzarà cap acció i romandrà en el mateix estat. Si, en canvi, el que rep és un esdeveniment *Desplaçar*, la cel·la realitza el següents passos:

- 1.- Executa el procediment *Calcular Destí*, el qual calcula si existeix una cel·la destí a la que propagar el lliscament.
- 2.a.- Si el procediment retorna una cel·la destí → continuar.
- 2.b.- Si retorna nul → canvia el seu estat a *Estàtic* i finalitza l'operació.
- 3.- Executa el procediment *Calcular Força*, el qual calcula la força en que arribarà la massa de neu del lliscament a la cel·la destí.
- 3.a.- Si el procediment retorna una força positiva → continuar
- 3.b.- Si no → canvia el seu estat a *Estàtic* i finalitza l'operació.

- 4.- S'envia a si mateixa un event *Enviar* amb les dades que ha de modificar..
- 5.- Envia un event *Rebre* a la cel·la destí amb les dades que aquesta ha de modificar.

En el cas que rebi un event *Enviar*, modifica la seva informació segons les dades calculades i el seu estat passa a ser *Buit*.

En el cas de rebre un event *Rebre*, modifica la seva informació segons les dades calculades per la cel·la origen del desplaçament del qual n'és destí i roman en el mateix estat.

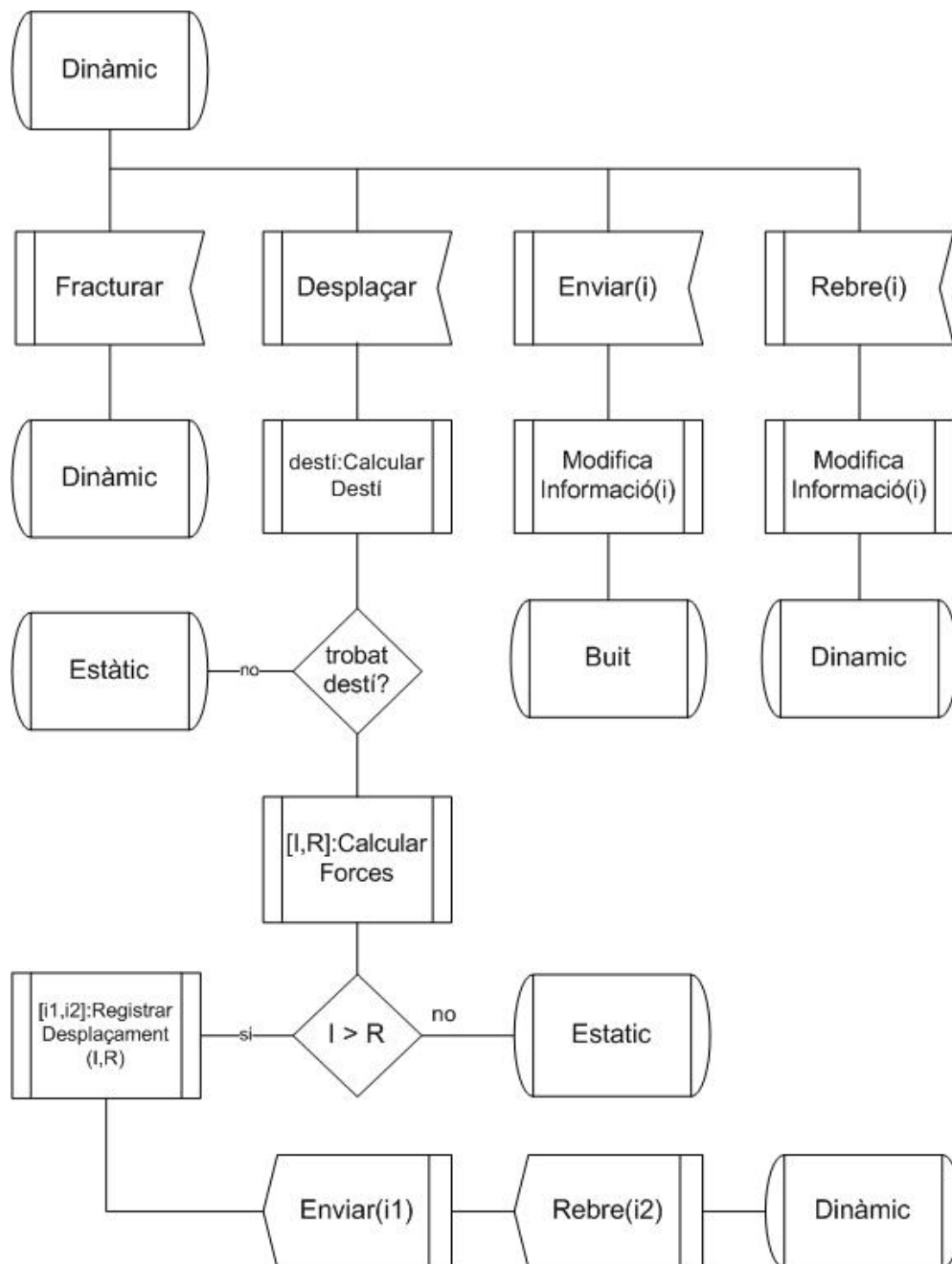


figura 3.12 – Diagrama de procés (Dinàmic)

3.2.8. Procediments

Un procediment és un algorisme que s'encarrega de realitzar uns determinats càlculs o modificacions en les dades d'una cel·la, exceptuant l'estat. Detallem en aquesta secció tots aquests mòduls de càlcul que es troben per igual en cada cel·la.

Procediment 'Modificar Informació'

El procediment *Modificar Informació* tracta la informació SIG rebuda com a paràmetre dels esdeveniments *Rebre* o *Enviar*. La seva tasca és la de modificar adequadament els valors de les capes (atributs) a partir de les dades enviades per una cel·la veïna o de si mateixa.

Les dades que haurà de manipular són: gruix i força. Si l'esdeveniment rebut és *Enviar* es decrementa el valor de la capa gruix i de la capa força/direcció segons els valors indicats. Per contra, si l'esdeveniment és *Rebre* aquests valors s'incrementen.

Procediment 'Calcular Destí'

El procediment *Calcular Destí* de la fase de lliscament aplica la primera part de la regla 2 o 3, segons si ens trobem en el primer pas de la fase de lliscament (2) o no (3).

La capa d'alçada de cada cel·la del veïnatge és la que intervé en aquest procediment. La cel·la, doncs, haurà d'enviar per cada cel·la del veïnatge un missatge *Consulta Informació* per tal de conèixer els seus valors. Si ens trobem en el primer pas de la simulació, la consulta és farà sobre tot el veïnatge, mentre que contràriament, el missatge s'haurà d'enviar a la cel·la en la direcció i sentit que dicta la força del moviment en aquell instant i a les cel·les esquerra i dreta d'aquesta per tal d'avaluar un possible canvi de trajectòria.

Rebudes les respostes, el procediment s'encarrega d'agafar les dades del port i aplicar la primera part de la regla, que és la de la determinació de la cel·la receptora del *possible* moviment de massa de neu.

Procediment 'Calcular Força'

El procediment *Calcular Força* de la fase de lliscament aplica la segona part de la regla 2 o 3, segons el pas en que ens trobem.

Per a realitzar el càlcul de la força impulsora i de les forces de resistència li calen el valor de les capes alçada, densitat i tipus de terreny de la cel·la destí, determinada en el

procediment *Calcular Destí*. Per tant, enviarà 3 missatges de petició d'informació, un per cadascun dels valors, a la cel·la destí.

Procediment 'Registrar Desplaçament'

La funció d'aquest procediment és la d'empaquetar l'informació a actualitzar a les cel·les origen i destí d'un desplaçament.

4. ANÀLISI

4.1. Anàlisi de requeriments

Definim els requeriments funcionals com aquells requeriments que descriuen les entrades i sortides del sistema i la relació que existeix entre ambdues. Per una altra banda els requeriments no funcionals són aquells que defineixen el sistema qualitativament, com per exemple factors de qualitat i rendiment.

4.1.1. Requisits funcionals

Actor del sistema: Usuari

- Importació de les dades del relleu a simular: L'usuari ha de poder crear l'escenari de la simulació, introduint els fitxers raster que contenen les dades georeferenciades en el format correcte. Les capes necessàries i obligatòries seran: alçada, gruix de neu i tipus de terreny superficial. L'usuari només cal que seleccioni la ubicació d'aquests fitxers. Finalitzada l'operació es mostrarà l'escenari per pantalla en tres dimensions.
- Importació d'objectes sobre l'escenari: L'usuari ha de poder afegir capes d'obstacles sobre l'escenari. Els possibles tipus d'obstacle es definiran pròximament. Aquestes capes són totalment opcionals, s'ha de poder realitzar la simulació amb o sense cap tipus d'obstacles. Els fitxers s'han de localitzar a la ubicació especificada anteriorment. L'aplicació ha de detectar les capes d'obstacles existents i donar la opció a l'usuari d'escollir les que vulgui introduir en el sistema. Finalitzada l'operació s'actualitzarà l'escenari virtual mostrant els objectes introduïts.
- Definició del trencament en la capa de neu: L'usuari ha de poder definir, sobre l'escenari, la localització del desencadenament de l'allau, es a dir, ha d'indicar a on es produirà la fractura de la capa de neu. L'usuari ha de poder definir una punt, una línia o un conjunt de línies de trencament, especificant les seves coordenades. Finalitzada l'operació s'actualitzarà l'escenari virtual mostrant les cel·les seleccionades.
- Inici de la simulació: Generat l'escenari i definida la fractura l'usuari podrà iniciar el procés de simulació de l'allau.

- Visualització de l'estat final de la simulació: Finalitzada la simulació, es mostraran els efectes de l'allau en l'escenari virtual. En concret, es podrà comprovar quines cel·les han estat afectades per l'allau, ja siguin cel·les on la massa de neu inicial ha desaparegut, formin part del camí de l'allau o formin part de la zona de dipòsit i, tanmateix, l'efecte de l'allau sobre els obstacles.
- Consulta sobre una parcel·la de terreny: Tant abans com després de la simulació, l'usuari ha de poder conèixer les característiques i el contingut d'una cel·la de l'escenari: alçada del relleu, gruix de la massa de neu, estat i obstacles que conté. Finalitzada la simulació, a més a més, es mostrarà, si es dona el cas de que la cel·la formi part del camí de l'allau, la probabilitat de destrucció dels obstacles de la cel·la.
- Consulta d'estadístiques: Finalitzada la simulació l'usuari podrà visualitzar algunes dades sobre l'allau simulat: massa desplaçada, força i acceleració màxima, pendents, desnivells, entre d'altres.
- Navegació per l'escenari: L'usuari ha de poder interactuar totalment amb l'escenari, tant abans com després de la simulació. La Realitat Virtual ha de permetre a l'usuari poder *caminar* o *volar* per l'escenari sense cap restricció.

4.1.2. Requisits no funcionals

Modificabilitat

Donat el fet de que el projecte té moltes possibles ampliacions, l'aplicació s'ha de construir de manera que el codi i l'especificació siguin el màxim llegibles possible i canviabls fàcilment. Es farà servir el patró de disseny MVC (Model Vista Controlador) per tal de separar les dades, la interfície i la lògica de control del simulador.

Eficiència

L'eficiència és un dels factors més rellevants. Donat el gran volum de dades que es podran arribar a tractar (podem tenir terrenys de grans extensions amb un bon nivell de detall). En el rendiment influirà ostensiblement la simplicitat dels càlculs i regles, l'optimització del codi i, tanmateix, el llenguatge de programació escollit.

Portabilitat

La portabilitat no serà un dels requisits fonamentals pel projecte, que serà inicialment específic per la plataforma Windows, tot i això el disseny ha de facilitar la portabilitat a altres plataformes introduint el mínim de canvis possible.

Visualització

La visualització ha de permetre mostrar un escenari virtual en tres dimensions, podent representar el relleu i objectes d'una part del món real, podent interactuar amb ell. Una gran carrega d'objectes, però, pot fer que la interacció amb aquest món virtual sigui molt costosa. S'ha decidit, per tant, que els objectes siguin representatius: Quan una cel·la de l'escenari contingui, per exemple, un tipus d'arbre, significarà que en el món real hi ha un conjunt d'arbres d'aquell tipus.

4.2. Arquitectura del sistema

S'emprarà el patró de disseny del software Model Vista Controlador (MVC) ja que afavoreix la modificabilitat, la portabilitat i la provabilitat.

- Model (procés): Implementació de les funcionalitats i dades del sistema.
- Vista (sortida): Presentació de la informació.
- Controlador (entrada): Gestió de la interacció amb l'usuari.

Model:

- Encapsula les funcionalitats i les dades del sistema.
- És independent dels mecanismes de presentació de la informació i d'interacció amb l'usuari.
- Proporciona al Controlador els serveis per satisfer les peticions de l'usuari.

Controlador:

- L'usuari interactua amb el sistema únicament mitjançant el controlador.
- Gestiona els esdeveniments de presentació i de modificació del model.

Vista:

- Permet presentar informació del model a l'usuari. Hi pot haver diverses vistes d'un mateix model.
- Té associat un Controlador que gestiona, si s'escau, els esdeveniments de modificació del Model.

Un canvi en una capa no afecta a les altres. Això ens estalvia haver de modificar la resta del sistema.

S'hauria de poder canviar la interfície d'usuari quan el software ja estigui implantat sense que això afectés al codi del nucli del sistema. Tanmateix, s'hauria d'aconseguir portar el programa a altres plataformes únicament canviant la capa de Vista.

En les tasques de desenvolupament podrem provar i validar les funcionalitats de cada capa sense haver de tenir de fer-ho amb tot el sistema sencer.

4.3. Procés d'enginyeria

El cicle de vida del desenvolupament serà l'anomenat cicle clàssic, el qual consisteix en dividir el projecte en fases que es succeeixen de manera lineal, només una vegada. No se'n realitza una fins que l'anterior es dona per acabada, podent retrocedir a una fase anterior en qualsevol punt del procés, donades les problemàtiques que puguin sorgir en una fase.

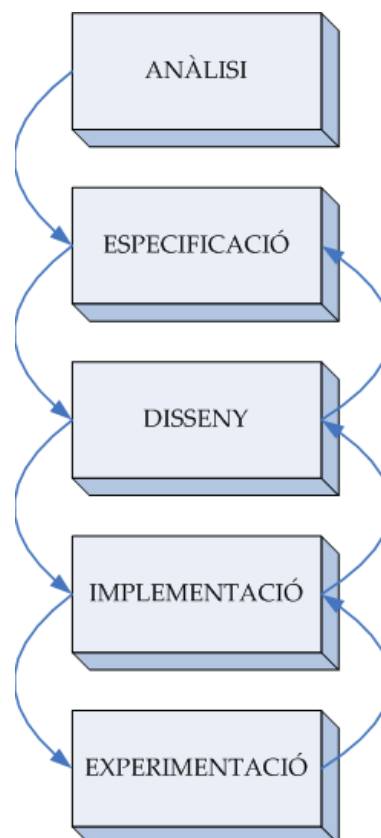


Figura 4.1 – Cicle de vida del projecte

4.4. Llenguatge de programació

4.4.1. Elecció del llenguatge de programació

Es pretén escollir el llenguatge de programació en funció dels següents factors:

- Reutilització de codi i llibreries existents
- Eficiència en execució
- Disponibilitat
- Portabilitat

Anàlisi dels llenguatges de programació més estesos

Java:

Llenguatge de programació orientat a objectes que no compila codi a binari (específic de la plataforma), sinó a Java Bytecode. El Java Bytecode s'executa dins de l'anomenada Java Virtual Machine, de tal manera que l'aplicació generada pot córrer en qualsevol plataforma que la tingui instal·lada, essent un gran avantatge. Per contra, Java presenta una major ineficiència respecte els programes compilats a codi màquina.

C++:

Llenguatge que ofereix la possibilitat de programació orientada a objectes, compila codi a binari (específic de la plataforma), és multiparadigma i estandaritzat. C++ va ser creat per afegir la orientació a objectes al llenguatge C. C és un llenguatge de programació procedural que va ser dissenyat per una eficient execució a nivell màquina. Compiladors de C++ existeixen per la majoria de plataformes, i al tractar-se d'un llenguatge de programació estandaritzat és possible crear aplicacions portables amb no gaires canvis, a més a més facilita la reutilització de codi i biblioteques existents. Tanmateix, els programes generats normalment presenten una major eficiència que els generats per altres llenguatges de programació.

Com a inconvenients tenim que la seva flexibilitat i/o optimització excessiva pot generar codis poc llegibles i difícils de mantenir. Tanmateix, algunes de les seves possibilitats mal emprades poden induir errors difícils de detectar i corregir.

C#:

C# és un llenguatge de programació orientat a objectes desenvolupat per Microsoft i estandaritzat com part de la seva plataforma .NET.

La seva sintaxi bàsica deriva de C/C++ i utilitza el model d'objectes de la plataforma .NET el qual és similar al de Java encara que inclou millores derivades d'altres llenguatges. C# va ser dissenyat per tal de combinar el control a baix nivell de llenguatges com C i la velocitat de programació de llenguatges com Visual Basic.

En l'actualitat els següents IDEs inclouen compiladors per C#:

- Microsoft Visual Studio .NET versió 2002, 2003 i 2005.
- Mono, implementació GPL de tot l'entorn .NET.
- Delphi 2005, de Borland Software Corporation.

Elecció i justificació

Considerant primordials l'eficiència i la reutilització de codi com a factors de decisió s'ha optat per desenvolupar el simulador en C++:

- Davant de Java, ja que existeix molta diferència en velocitat entre ambdós llenguatges. Tanmateix, amb pocs canvis (en principi només la interfície) es podria adaptar l'aplicació a altres plataformes (punt fort de Java).
- Davant de C#, ja que encara que tenen un rendiment similar, fins i tot C# superior segons els últims informes presentats per Microsoft (podria ser una maniobra comercial), perquè es disposa d'una llibreria de classes que ens facilitaran la tasca d'importació de dades SIG al sistema i la seva representació gràfica i, tanmateix, perquè el desenvolupament de compiladors per altres plataformes que no siguin Windows encara està en fases poc avançades (Projecte Mono).

4.4.2. Entorn de desenvolupament

Decidit el llenguatge de programació, s'emprarà la IDE (Integrated Development Environment) Visual Studio .NET 2003 de Microsoft, ja que se'n disposa de la llicència, és un entorn familiar pel programador i disposa d'una excel·lent eina d'ajuda i documentació.

4.4.3. Llibreria GUI

Per al desenvolupament de la GUI (Interfície Gràfica d'Usuari) s'emprarà la llibreria pròpia per l'entorn Windows, MFC (Microsoft Foundation Classes), inclosa a Microsoft Visual C++. Aquesta llibreria, però, no ens garanteix la portabilitat a altres plataformes.

wxWidgets (anomenada wxWindows fins l'any 2004) és una llibreria de classes que permet compilar programes amb interfície gràfica escrits en c++ en diverses plataformes. wxWidgets defineix una API comú per totes les plataformes, però empra la GUI pròpia de cadascuna, pel que el programa adquireix l'aparença típica de qualsevol aplicació per la plataforma.

L'article *Porting MFC applications to Linux* de Markus Neifer [18] explica una sèrie de mecanismes per tal de portar una aplicació desenvolupada amb MFC, llibreria exclusiva de Windows, a la plataforma Linux, realitzant una *traducció* dels noms de les classes d'aquesta, donades les semblances existents entre les dues llibreries.

Posteriorment a la implantació del simulador pel sistema operatiu Windows, podrem comptar, doncs, amb aquesta eina per a la *traducció* de la llibreria GUI, en cas de que es volgués portar l'aplicació a altres plataformes.

4.5. Representació SIG

En la primera etapa del projecte s'han analitzat dos dels sistemes de representació d'informació geogràfica més estesos amb l'objectiu d'escollir-ne el que aplicarem en el simulador. Podem trobar explicades, a grans trets, les seves característiques en el segon capítol.

La decisió final ha estat relativament imminent al modelar les capes de l'autòmat: donat que la majoria de capes del model són de tipus raster, de fet només disposem d'una capa vectorial, era clar que el sistema Idrisi32 era el candidat adequat ja que és un sistema purament raster i que permet la conversió de capes vectorials per casos com el nostre.

4.6. Realitat Virtual

Per a la representació gràfica en 3D de l'escenari i de l'allau es farà servir la tecnologia VRML (en contret la versió 97 o 2.0) per dos motius: a) ja que es tracta d'una tecnologia *no propietari*, i b) ja que disposem d'una llibreria de classes que ens permetrà realitzar el

pas de dades del sistema a codi VRML, havent d'implementar tan sols algun detall propi de la simulació d'allaus.

En l'aplicació cada cop que vulguem representar un fet el procés que cal seguir és el següent: primer, generar el fitxer amb el codi de les dades SIG en VRML i, segon, carregar aquest fitxer en un control (VRML browser) de la interfície d'usuari. Finalitzada la operació l'usuari ja podrà interactuar amb el món generat.

Coneguem, a grans trets, les característiques de la tecnologia VRML i de la seva successora: X3D, a la qual es podria realitzar una migració en una ampliació del projecte.

VRML

VRML és un format d'arxiu que permet la creació d'objectes i móns tridimensionals interactius. L'estàndard VRML va ser creat i desenvolupat pel VRML Consortium, una organització, en un principi, sense ànim de lucre centrada exclusivament en el desenvolupament i promoció de VRML com estàndard 3D per Internet. VRML va aparèixer en escena el 1994 i va arribar a ser la primera tecnologia reconeguda oficialment per la ISO (International Organization for Standardization) com estàndard per a la creació, distribució i representació d'elements 3D a través d'Internet.

VRML va ser dissenyat per complir amb els següents requeriments bàsics:

- Habilitar la possibilitat del desenvolupament de programes per a crear, editar i mantenir arxius VRML, a més de programes per a la importació i exportació del format VRML a altres formats gràfics tridimensionals (Authorability).
- Aportar la capacitat d'emprar, combinar i reutilitzar objectes dinàmics tridimensionals dintre d'un mateix món VRML (Composability).
- Incorporar la capacitat de crear nous tipus d'objectes no definits específicament com part de VRML (Extensibility).
- Obrir la possibilitat de que sigui implementat en una àmplia varietat de sistemes presents en el mercat (Implementable).
- Ressaltar la importància del funcionament interactiu en una àmplia varietat de plataformes existents (Performance).
- Permetre la creació de mons tridimensionals de qualsevol grandària (Scalability).

VRML és un llenguatge jeràrquic de marques que usa *nodes*, *esdeveniments* i *camp*s per a modelar realitats virtuals tant estàtiques, com dinàmiques. Els *nodes*, que s'empren per a instanciar alguna de les 54 primitives del llenguatge, no són més que una col·lecció de camps que contenen els atributs bàsics de la primitiva.

Els camps són els atributs que defineixen el comportament de la primitiva, amb l'excepció dels camps especials (`eventIn` i `eventOut`) que permeten enviar i rebre esdeveniments a altres *camps*. Mitjançant aquests *camps* especials es pot controlar el flux d'esdeveniments, encaminant l'efecte d'una acció entre múltiples objectes per a animar una escena o simplement passar informació a aquests objectes.

Cal indicar que VRML és “case sensitive” i mai acceptarà un codi que no respecti l'ús precís de majúscules i minúscules.

Les primitives de VRML s'agrupen en nou col·leccions diferents:

- Agrupació de nodes
- Grups especials
- Sensors
- Geometria
- Propietats de geometria
- Aparença de la geometria
- Interpoladores
- Nodes excloents
- Nodes comuns

X3D

X3D és un estàndard obert XML, un format d'arxiu 3D que permet la creació i transmissió de dades 3D entre diferents aplicacions i, especialment, aplicacions en xarxa. Les seves principals característiques són les següents:

- X3D està integrat en XML: això representa un pas fonamental a l'hora d'aconseguir una correcta integració en:
 - Serveis Web.
 - Xarxes Distribuïdes.
 - Sistemes multiplataforma i transferència d'arxius i dades entre aplicacions.
- X3D és modular: això permet la creació d'un nucli 3D més lleuger ajustat a les necessitats dels desenvolupadors.
- X3D és Extensible: permet afegir components per a ampliar les funcionalitats segons les necessitats del mercat.
- X3D és Perfilat: es poden escollir diferents grups d'extensions apropiades segons les necessitats específiques de l'aplicació.

- X3D és Compatible amb VRML: es manté el desenvolupament, el contingut i la base de VRML97.

X3D, en lloc de mantenir una única especificació àmplia i estàtica, com VRML, que requereix la completa adopció de la mateixa per a aconseguir la compatibilitat amb X3D, ha optat per una arquitectura basada en components que dona suport per a la creació de diferents perfils, els quals poden ser individualment suportats. Els components poden ser individualment estesos o modificats agregant nous nivells, o afegint nous components amb noves característiques. A través d'aquest mecanisme, es pretén aconseguir que els avenços de l'especificació siguin ràpids i que el desenvolupament en un àrea no enredereixi l'evolució de l'especificació en el seu conjunt.

Els perfils definits en l'actualitat en X3D són els següents:

- Intercanvi: és el perfil bàsic per a la comunicació entre aplicacions. Aquest perfil dona suport a les geometries, les textures, les il·luminacions bàsiques i les animacions.
- Interactiu: és el perfil encarregat d'aportar les capacitats bàsiques d'interacció amb l'escenari virtual mitjançant la incorporació de diversos nodes sensorials (PlaneSensor, TouchSensor, etc.). A més aporta més capacitats d'il·luminació (Spotlight, PointLight).
- Immersiu: habilita totes les capacitats de gràfics 3D i interacció amb l'entorn, a més inclou el suport per a àudio, col·lisions, boira i scripting.
- Complet: inclou tots els nodes definits incloent els components Nurbs, H-Anim i GeoSpatial.

VRML i X3D

X3D pren el treball seguit per VRML97 i clarifica les zones grises que no havien estat cobertes per l'especificació a través dels anys. Preses com a premissa les bases proposades per VRML, s'intenta oferir una major flexibilitat. Els grans canvis inclouen la completa reescriptura de l'especificació en tres parts diferents que tracten conceptes abstractes, formats d'arxiu i accessos al llenguatge de programació. Altres modificacions impliquen una major precisió amb la il·luminació i els models d'esdeveniments, i canviar el nom d'alguns camps per a aconseguir una major consistència de l'estàndard.

Els principals canvis es poden resumir en de la següent manera:

- Expansió de les capacitats gràfiques.

- Un model de programació d'aplicacions revisat i unificat.
- Múltiple codificació d'arxius per a descriure un model abstracte, incloent XML.
- Arquitectura modular.
- Expansió de l'estructura de l'especificació. La gràfica de l'escena X3D, el cor d'una aplicació X3D, és idèntica a la gràfica de l'escena VRML97.

5. ESPECIFICACIÓ

5.1. Casos d'ús

Un cas d'ús és una tècnica per a la captura de requisits potencials de sistemes. Cada cas d'ús proporciona un o més escenaris que indiquen com hauria d'interactuar el sistema amb l'usuari o amb un altre sistema per tal d'aconseguir un objectiu específic. Normalment, en els casos d'ús s'evita l'ús d'argots tècnics, preferint en el seu lloc un llenguatge més proper a l'usuari final.

5.1.1. Diagrama de casos d'ús

Els principals casos d'ús en què es pot trobar l'usuari són els següents:

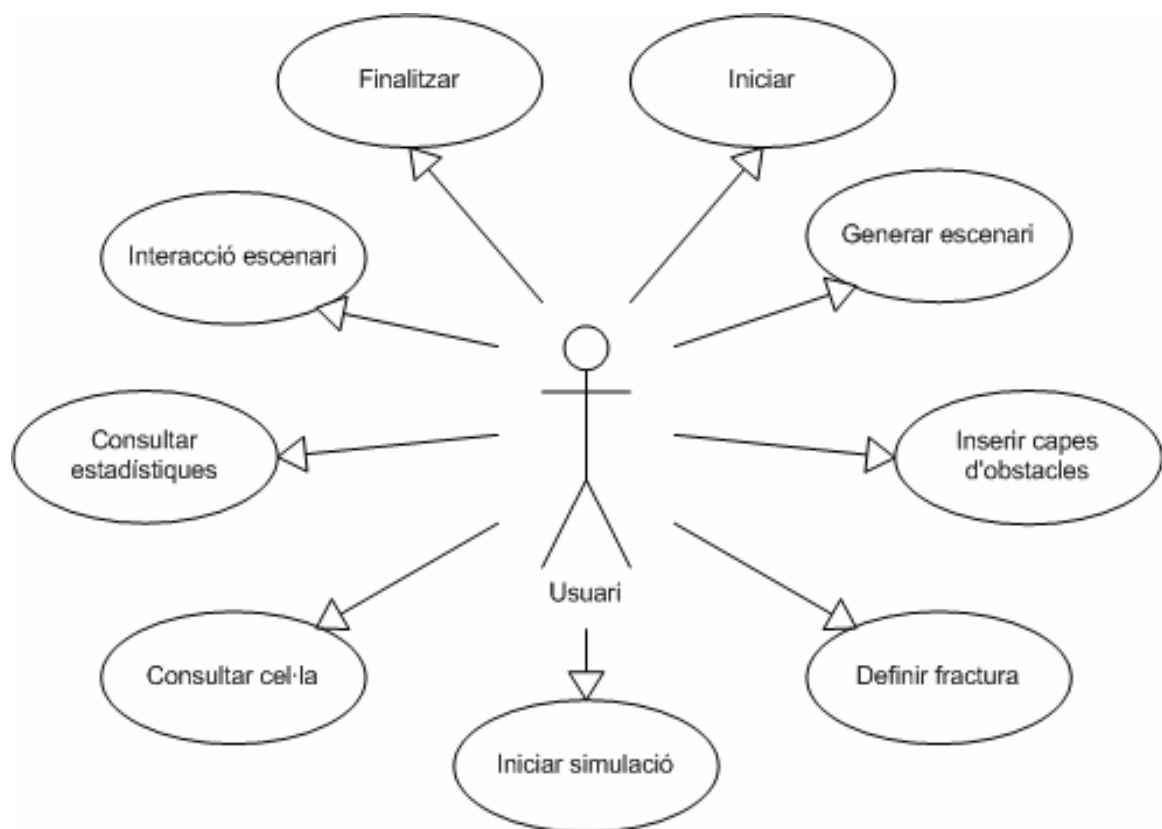


Figura 5.1 – Diagrama de casos d'ús

5.1.2. Especificació dels casos d'ús

INICIAR EL SISTEMA

Cas d'ús: Iniciar el sistema

Propòsit: Preparar el sistema.

Curs típic d'esdeveniments:

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|--------------------------------|---|
| 1) L'usuari inicia el sistema. | 2) El sistema carrega el control de visualització de l'escenari 3) El sistema habilita l'acció 'Generar escenari'. |

GENERAR ESCENARI

Cas d'ús: Generar escenari

Propòsit: Introduir en el sistema les dades necessàries per a que es pugui realitzar la simulació i, si aquestes són en el format correcte, mostrar la representació de l'escenari.

Curs típic d'esdeveniments:

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|---|---|
| 1) L'usuari indica que vol introduir les dades de l'escenari on es produirà la simulació. 3) L'usuari selecciona un directori. | 2) El sistema mostra un arbre de directoris per tal de que l'usuari seleccioni la ubicació dels fitxers SIG del terreny. 4) El sistema comprova que el directori conté els fitxers necessaris. 5) El sistema comprova que els fitxers estan en el format correcte. 6) S'incorporen les dades al sistema i es genera el món virtual. 7) S'habiliten els casos d'ús 'Inserir capes d'obstacles', 'Definir fractura' i 'Consultar Cel·la'. |

Flux alternatiu A: Usuari cancel·la l'operació

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|-------------------------------------|----------------------------|
| A3) L'usuari cancel·la la operació. | A4) Finalitza el cas d'ús. |

Flux alternatiu B: El sistema no troba els fitxers

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|--------------------|---|
| | B4) El sistema mostra per pantalla un missatge que indica que el directori indicat no conté algun fitxer SIG necessari. B5) Finalitza el cas d'ús. |

Flux alternatiu C: Els fitxers estan en un format incorrecte

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|--------------------|---|
| | C4) El sistema mostra per pantalla un missatge que indica que un fitxer no està en el format correcte. C5) Finalitza el cas d'ús |

INSERIR CAPES D'OBSTACLES**Cas d'ús:** Inserir capes d'obstacles**Propòsit:** Afegir capes SIG opcionals en el sistema.**Curs típic d'esdeveniments:**

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|---|--|
| 1) L'usuari indica que vol afegir al sistema dades SIG opcionals (obstacles). | |
| 3) L'usuari selecciona les capes d'obstacles que vol afegir al sistema. | 2) El sistema mostra una finestra on indica les capes d'obstacles que s'han trobat en el directori del mapa. |
| | 4) S'incorporen les dades al sistema i es torna a generar el món virtual. |

Flux alternatiu A: Usuari cancel·la l'operació

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|-------------------------------------|----------------------------|
| A3) L'usuari cancel·la la operació. | A4) Finalitza el cas d'ús. |

DEFINIR FRACTURA**Cas d'ús:** Definir fractura

Propòsit: Generat l'escenari sobre el qual es desenvoluparà la simulació, identificar, mitjançant una línia, on s'ha de produir el trencament de la capa de neu per tal de desencadenar l'allau.

Curs típic d'esdeveniments:

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|---|---|
| 1) L'usuari indica que vol definir el trencament de la capa de neu. | 2) El sistema mostra una finestra per a que l'usuari seleccioni les coordenades dels punts de la línia de trencament (en ordre). |
| 3) L'usuari introdueix els punts de la línia de trencament. | 4) El sistema comprova que les coordenades són correctes. 5) S'incorpora les dades al sistema i es torna a generar l'escenari mostrant la nova situació. 6) S'habilita el cas d'ús 'Iniciar Simulació'. |

Flux alternatiu A: Usuari cancel·la l'operació

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|-------------------------------------|----------------------------|
| A3) L'usuari cancel·la la operació. | A4) Finalitza el cas d'ús. |

Flux alternatiu B: Coordenades fora de límits

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|--------------------|--|
| | A4) El sistema detecta que alguna coordenada introduïda es troba fora de límits i mostra un missatge d'error a |

| | |
|--|-------------------------------------|
| | l'usuari. A5) Es torna al pas 3. |
|--|-------------------------------------|

INICIAR SIMULACIÓ

Cas d'ús: Iniciar simulació

Propòsit: Definit l'escenari i seleccionada la línia de fractura de la capa de neu, iniciar la simulació de l'allau fins arribar a l'estat final.

Curs típic d'esdeveniments

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|--|---|
| 1) L'usuari indica que vol iniciar el procés de simulació. | 2) El sistema realitza la simulació fins arribar a l'estat final. 3) Es torna a generar el món virtual mostrant l'estat final i els efectes de la simulació en el seu transcurs. 4) S'habilita el cas d'ús 'Consultar estadístiques'. |

CONSULTAR CEL·LA

Cas d'ús: Consulta d'una cel·la

Propòsit: Mostrar per pantalla la informació d'una cel·la del mapa (alçada, gruix de neu, estat del terreny i objectes presents).

Curs típic d'esdeveniments

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|---|---|
| 1) L'usuari indica que vol consultar les dades d'una determinada cel·la introduint les seves coordenades. 3) En cas que l'usuari vulgui consultar més cel·les tornar al pas 1. | 2) El sistema mostra la informació de la cel·la indicada. |

CONSULTAR ESTADÍSTIQUES

Cas d'ús: Consulta d'estadístiques

Propòsit: Mostrar per pantalla dades d'interès referents a l'allau simulada (massa de neu, pendents, acceleració, forces, etc).

Curs típic d'esdeveniments

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|--|--|
| 1) L'usuari indica que vol consultar la les estadístiques de la simulació. | 2) El sistema mostra una finestra amb la informació. |

INTERACTUAR AMB L'ESCENARI

Cas d'ús: Interacció escenari

Propòsit: L'usuari modifica la posició i l'angle de la *càmera* dins del món virtual.

Curs típic d'esdeveniments

| Accions de l'actor | Resposta del sistema |
|--|---|
| 1) L'usuari realitza una de les següents accions sobre el mapa: anar endavant, anar enrere, zoom endavant, zoom enrere, rotar esquerra, rotar dreta, voltejar endavant o voltejar enrere en el mode vol o caminar. | 2) El control de visualització del món virtual s'actualitza segons l'acció realitzada per l'usuari. |

5.2. Patró arquitectònic

Tal com hem anunciat en el capítol anterior, l'arquitectura del sistema haurà de seguir el patró Model-Vista-Controlador. Això significa, primer, que emprarem l'orientació a objectes i, segon, que haurem de separar tota classe que implementi la interacció amb l'usuari amb les classes que emmagatzemin i gestionen les dades de la simulació.

Per a la construcció del simulador diferenciem 3 tipus de classe:

- 1) Les classes de **Vista**, que seran les classes que implementen la presentació de l'aplicació.
- 2) La classe **Controlador**, de la qual només en tindrem una instància, que serà la responsable de gestionar els esdeveniments de presentació i de modificació del model generats per l'usuari
- 3) Les classes del **Model**, que encapsulen les funcionalitats i les dades del sistema i proporcionen al Controlador els serveis per satisfer les peticions de l'usuari.

Tanmateix, en el Model fem una diferenciació entre 3 tipus de classe:

- 1) Les classes de **Dades**: que són aquelles classes que emmagatzemen tota la informació referent a l'escenari, la simulació i la representació d'aquest.
- 2) Les classes de **Gestió** de les dades: que són les encarregades de operar tant amb les dades de l'escenari com amb les de la simulació.
- 3) Les classes de **Generació** de la representació, que són les encarregades de generar el món virtual en el qual podrà interactuar l'usuari.

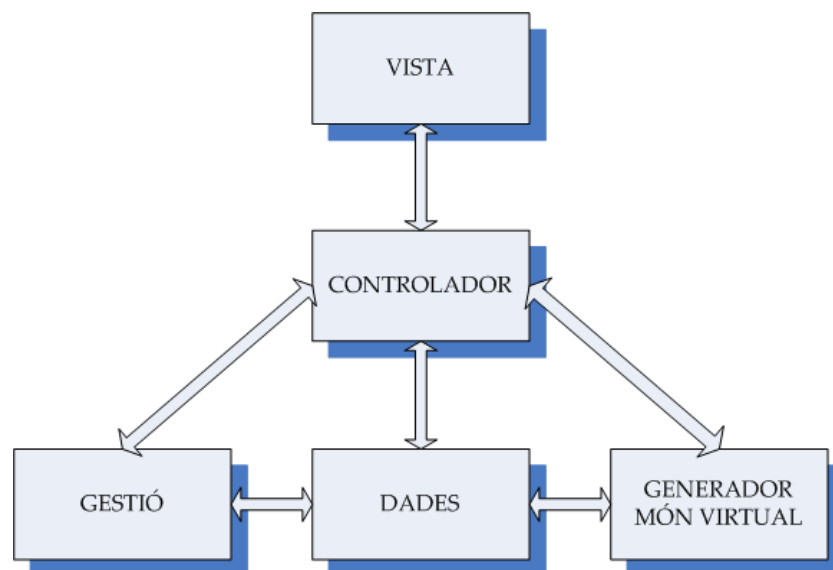


Figura 5.2 – Arquitectura MVC

5.3. Comportament del sistema

Els diagrames de seqüència en UML ens permeten representar la seqüència de processos, més concretament l'intercanvi de missatges, dels objectes del simulador.

A continuació mostrem els diagrames més rellevants i de manera simplificada amb l'objectiu de donar una idea global del procediment per cada funcionalitat. Primer veurem els diagrames per a les funcionalitats que permeten l'inserció de dades SIG al sistema. Per últim, mostrarem el diagrama pel procés de simulació, que donarà una idea general del comportament del motor de simulació.

En cada diagrama la classe controlador rep una petició des de l'interfície d'usuari.

Diagrama 1: Generació d'escenari

En aquest procés es llegeixen les dades dels fitxers Idrisi32 de les capes de dades d'alçada, gruix i tipus de terreny subjacent.

Diagrama 2: Importació d'obstacles

De la mateixa manera que en el procés anterior es llegeixen les dades dels fitxers de les capes d'obstacles, el número del qual és variable.

Diagrama 3: Inserció de la fractura de desencadenament

En aquest cas es llegeixen els fitxers de tipus vectorial que contenen el punt o línies de trencament de la massa de neu. Aquests fitxers ja han estat generats per l'usuari, mitjançant la interfície.

Diagrama 4: Flux de la simulació

En aquest diagrama podrem veure el comportament del motor, les consultes que realitza a l'objecte que emmagatzema les dades de l'escenari *DadesGrid*, i l'ús de les estructures definides en el capítol de Modelatge. Es pot diferenciar clarament la fase de propagació (on les cel·les apliquen la regla d'evolució 1) i la fase de lliscament (on les cel·les apliquen les regles 2 i 3), dividida, a la vegada, en l'etapa de càlcul i l'etapa de modificació.

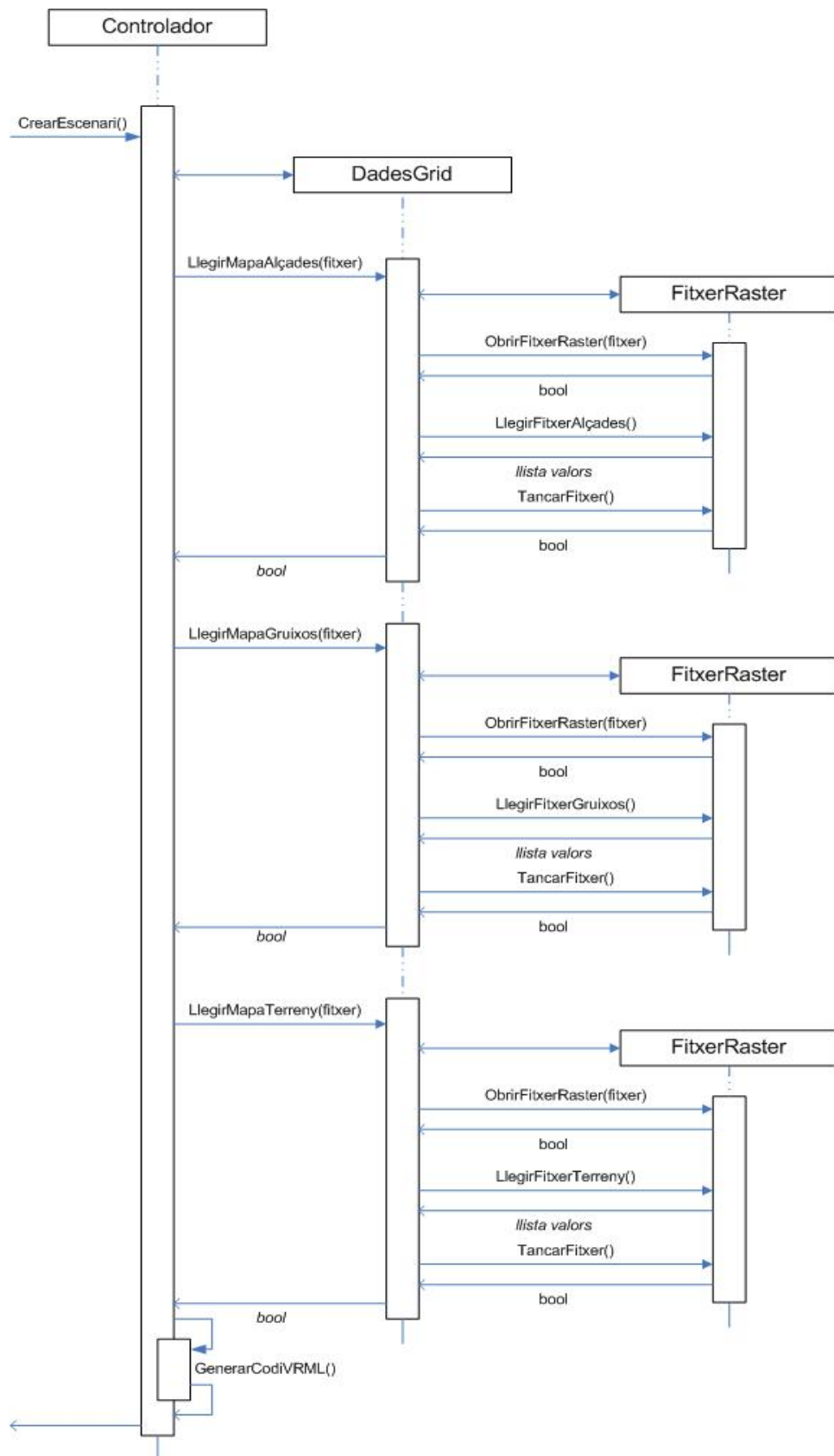


Figura 5.3 – Diagrama de seqüència 1: Generar Escenari

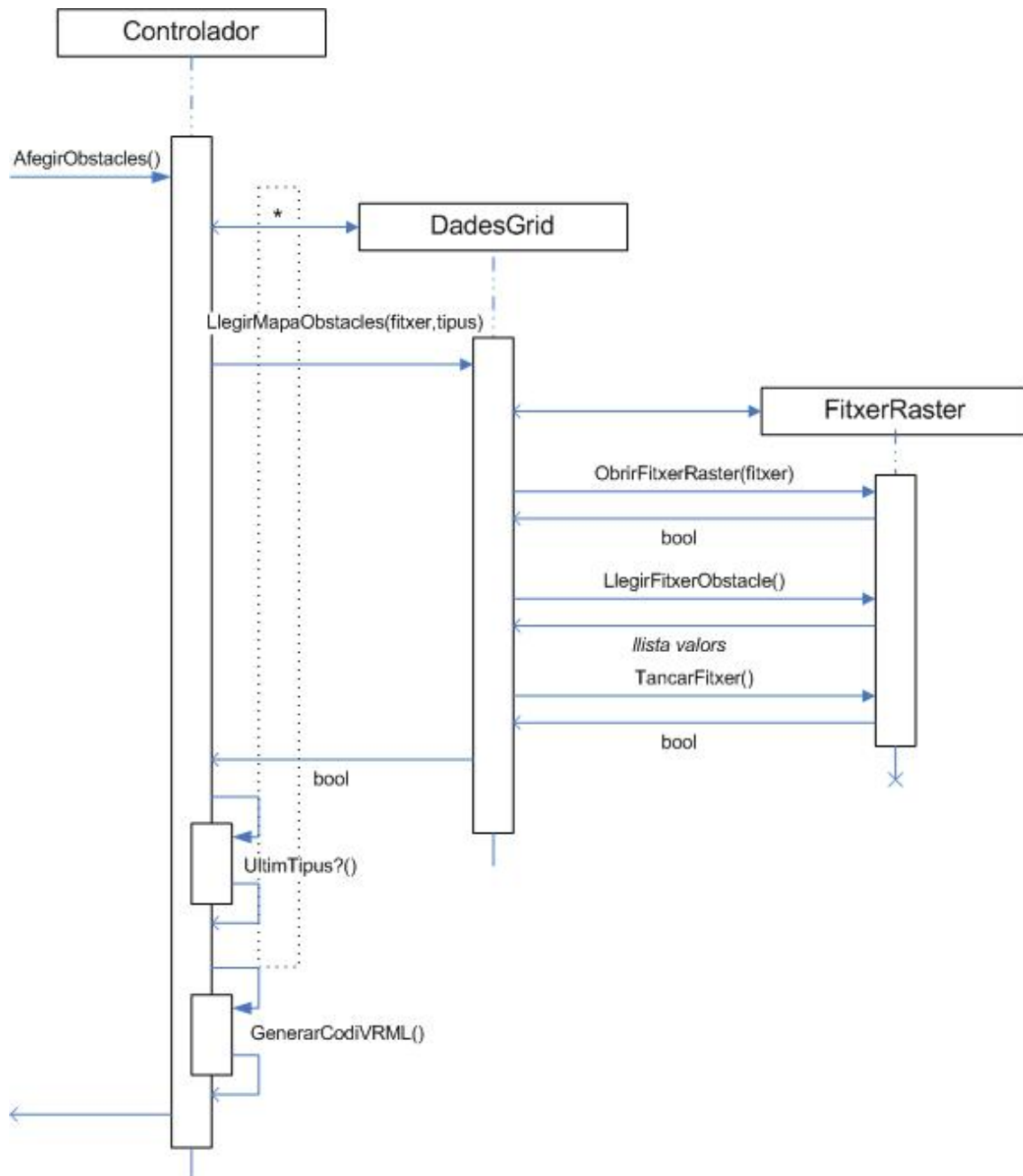


Figura 5.4 – Diagrama de seqüència 2: Inserir obstacles

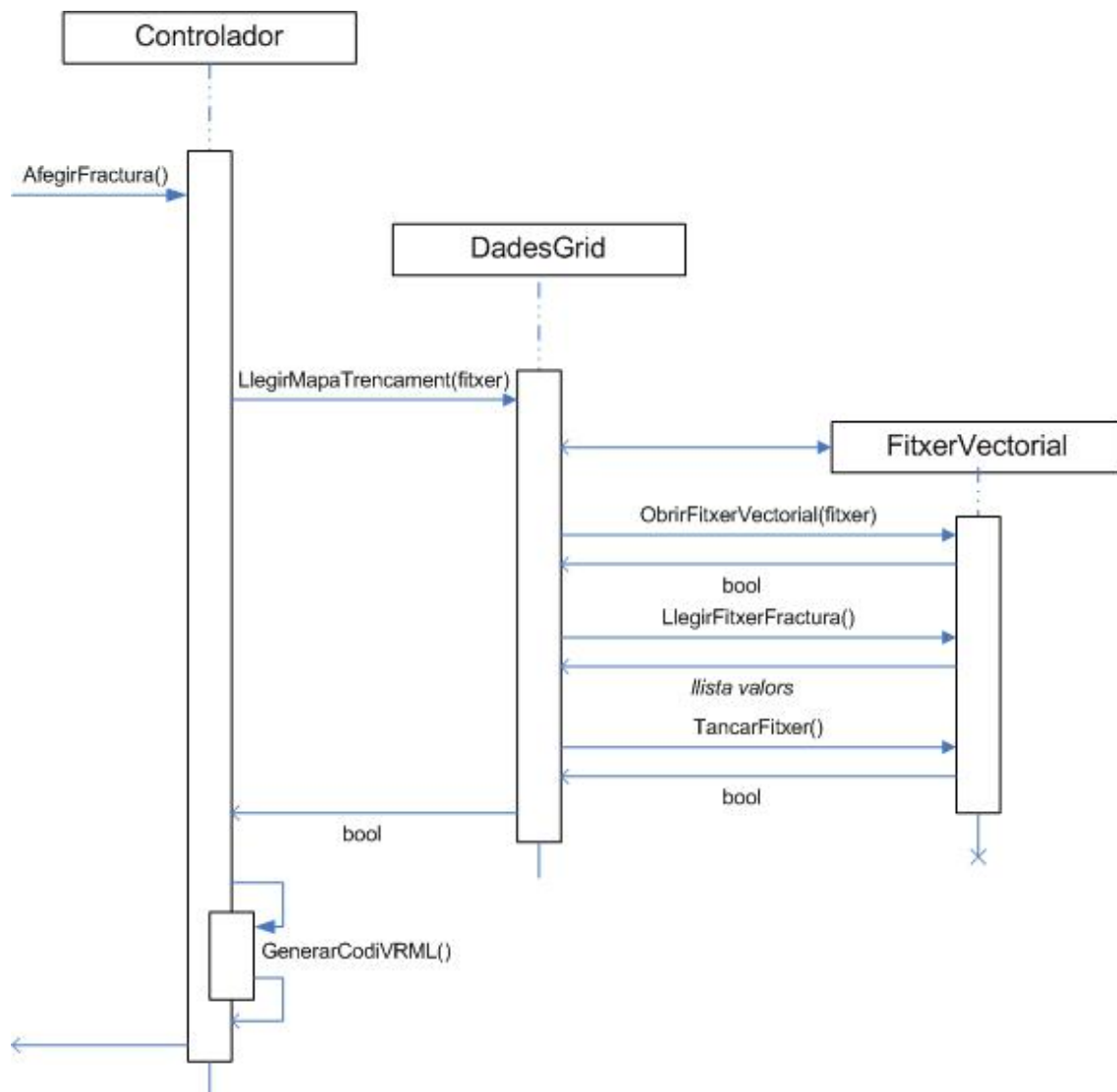


Figura 5.5 – Diagrama de seqüència 3: Inserir fractura

5.4. Model conceptual

Presentem el model conceptual en UML del sistema. Donada la grandària d'aquest, s'ha dividit en 6 diagrames estàtics d'estructura dels objectes del domini. Només inclourem les classes principals del sistema. Tanmateix, en aquestes s'ha suprimit la especificació de mètodes trivials.

Cal dir que aquest és el model en el moment de finalitzar el projecte, el qual difereix de l'inicial ja que durant el desenvolupament de l'aplicació s'han anat afegint mètodes i funcionalitats segons les problemàtiques sorgides durant les etapes de disseny, implementació i experimentació.

Tal com hem mencionat en l'anàlisi, per tal de desenvolupar l'aplicació, hem tingut la possibilitat de reutilitzar algunes classes del projecte *VirtualLands* desenvolupades pel grup d'investigació de simulació de la UPC. Naturalment, s'han afegit diverses funcionalitats i modificacions sobre aquestes per tal de poder-les ajustar al model de simulació d'allaus. Aquestes classes pertanyen als grups de Dades i Generació del món virtual del Model, les quals permeten importar i emmagatzemar dades provinents de fitxers raster i vectorials en format Idrisi32 al sistema i generar la representació del món virtual.

Primerament descrivim breument el contingut de cadascun dels 6 diagrames.

Diagrama 1: Controlador

El controlador és la part del sistema que gestiona els esdeveniments de presentació i de modificació generats per l'usuari. Incorpora una connexió amb la classe *DadesGrid*, que és la classe base de les dades del simulador. Aquesta connexió serveix de referència per a les classes de gestió i de generació. Incorpora el motor de la simulació, al qual indica que s'iniciï quan ho demana l'usuari, i a més a més, utilitza objectes generadors de móns virtuals en VRML (*GeneradorObstacles*, *GeneradorAccessoris*, *AllausVRMLTexts*), que permeten a l'usuari poder visualitzar l'escenari després de determinats esdeveniments.

Diagrama 2: DadesGrid

DadesGrid és la classe que implementa i emmagatzema les dades del conjunt de cel·les, tanmateix, incorpora dades de referència per a la generació del món virtual.

Diagrama 3: Ampliació de DadesGrid

S'han afegit nous conjunt d'objectes a la classe *DadesGrid* per tal de reutilitzar-la per a la simulació d'allaus. *AllausCapesCella* és un tipus d'objecte que emmagatzema l'estat i la informació SIG de cada cel·la (excepte alçades, que ja s'emmagatzemava en la classe original). *AllausTerreny* emmagatzema la informació dels tipus de terreny i *AllausObstacles* la informació dels diferents tipus d'objecte que es poden presentar en l'escenari de la simulació.

Diagrama 4: Motor de simulació

El motor de simulació disposa d'una referència a les dades del conjunt de cel·les, gestiona i emmagatzema les dades pròpies de la simulació i controla aquesta des de l'estat inicial fins a la seva finalització. *AllausEstructures* emmagatzema i implementa les llistes de control de la simulació (*Llista de Dinàmics* i *Llista de Canvis*). *AllausEstructures*, per la seva banda, va emmagatzemant dades relatives a la simulació de l'allau segons els càlculs realitzats en el motor. La consulta d'aquestes dades esdevé disponible una vegada s'ha finalitzat la implementació.

Diagrama 5: Jerarquia de Generadors

Utilitzem els objectes generadors amb l'objectiu de crear i manipular el codi de representació del món virtual. En el diagrama veiem la jerarquia de generadors: la superclasse *GeneradorVRML* implementa les característiques generals del codi VRML, *GeneradorGrid* afegeix el tractament de fitxers raster generant el codi de la malla del terreny, *GeneradorAccessoris* incorpora el tractament de fitxers vectorials i *GeneradorObstacles* permet llegir els fitxers d'obstacles i col·locar aquests sobre la malla.

Diagrama 6: Interfície d'usuari

Per a crear la interfície d'usuari s'han emprat *diàlegs* de les llibreries MFC. El Diàleg principal és *DlgVisor*, el qual mostra el món virtual i permet l'accés als Diàlegs auxiliars. Consta d'una connexió amb la classe *Controlador*, la qual tracta les peticions de l'usuari en aquestes classes. Més endavant ja veurem quines són les possibilitats de l'interfície d'usuari.

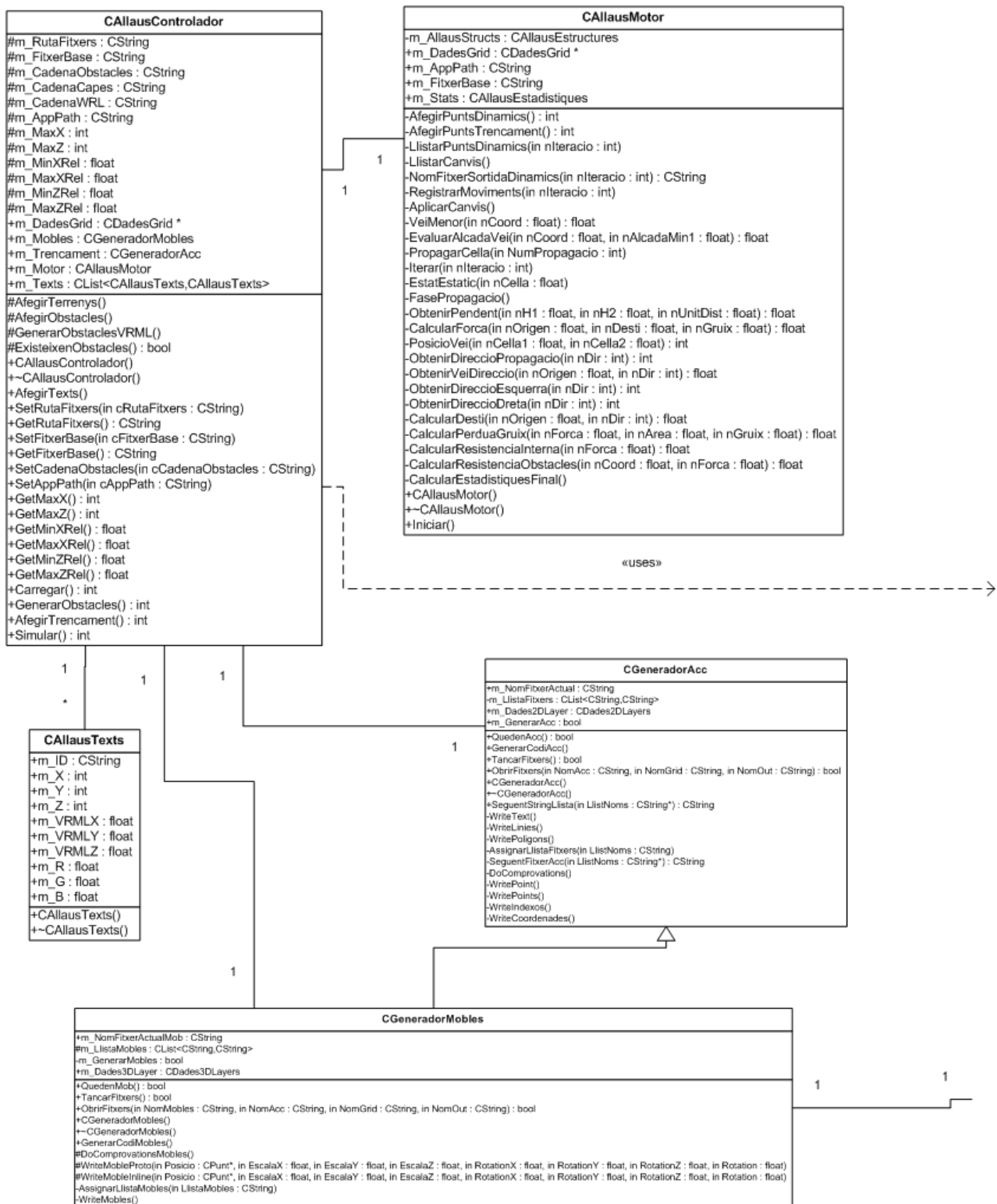


Figura 5.7 – Diagrama de classes 1: Controlador

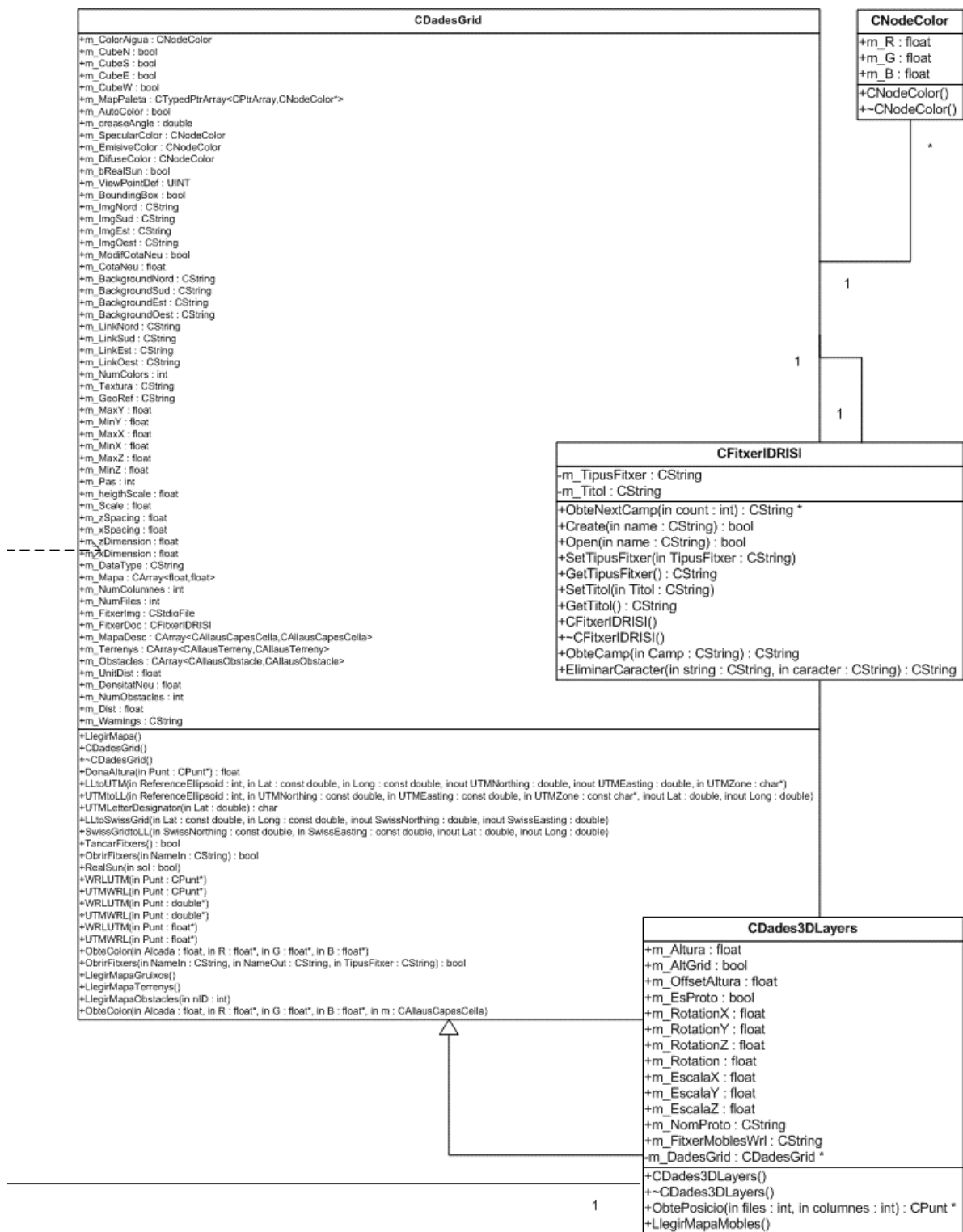


Figura 5.8 – Diagrama de classes 2: DadesGrid

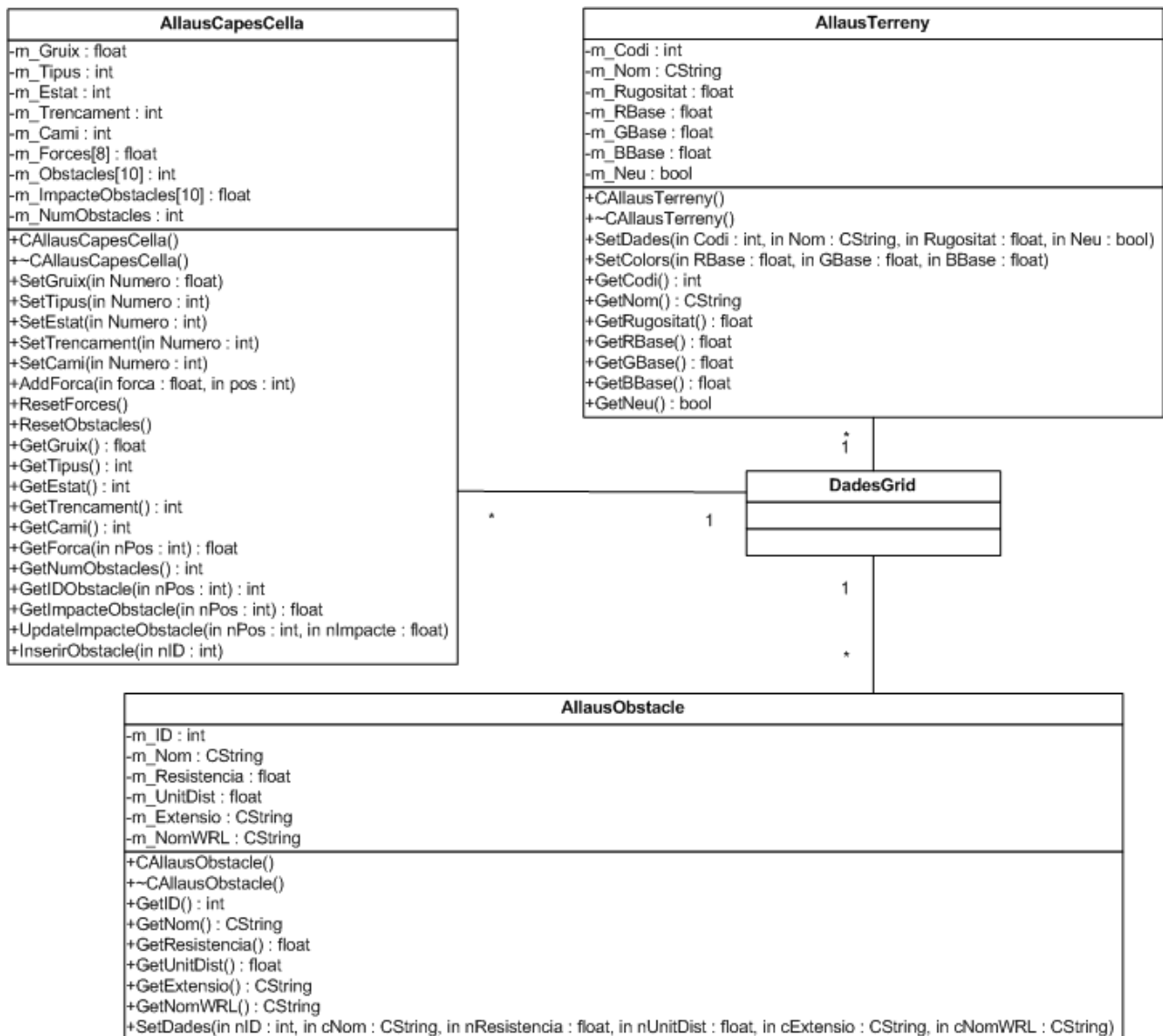


Figura 5.9 – Diagrama de classes 3: Ampliació de DadesGrid

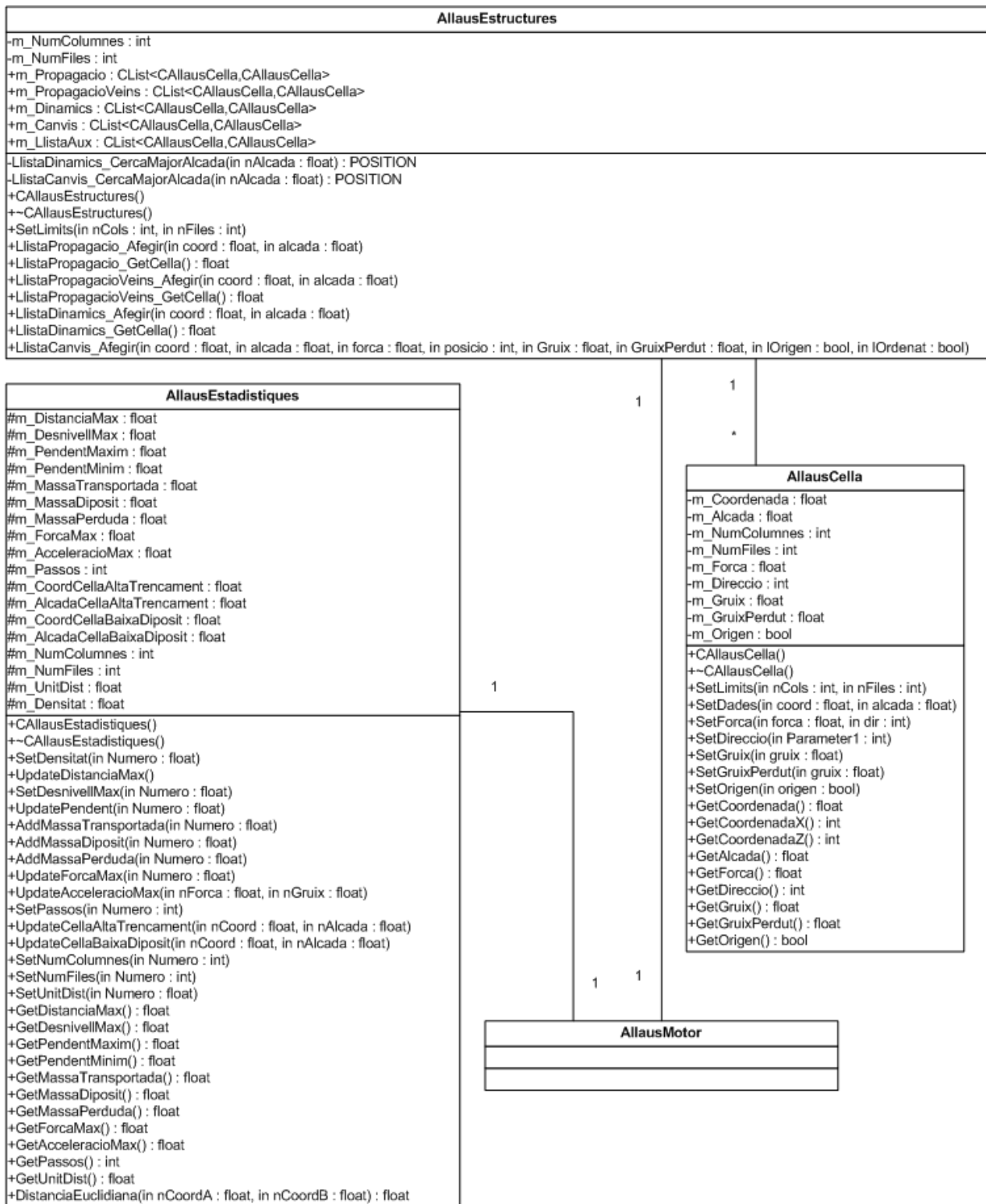


Figura 5.10 – Diagrama de classes 4: AllausMotor

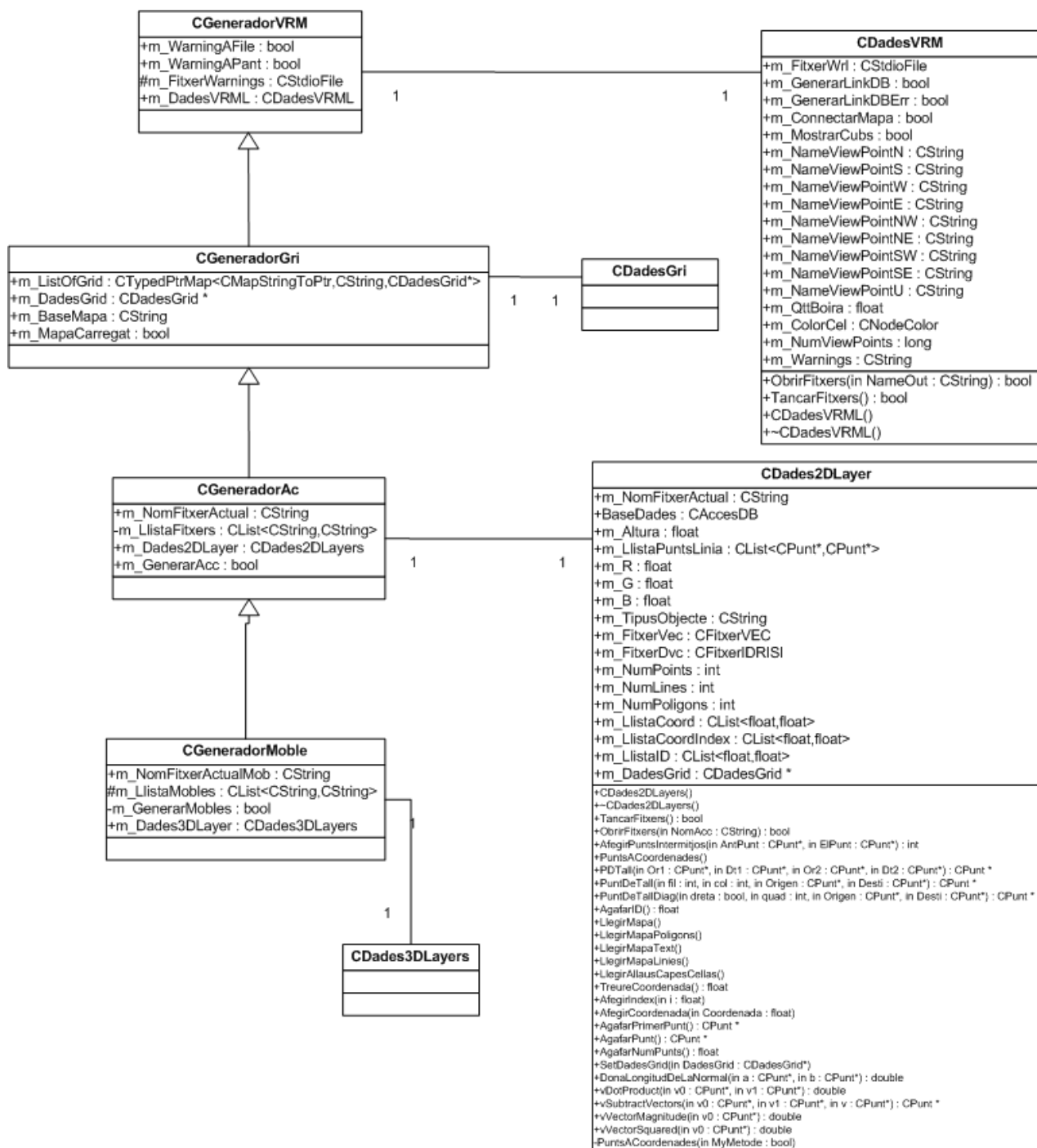


Figura 5.11 – Diagrama de classes 5: Jerarquia de Generadors

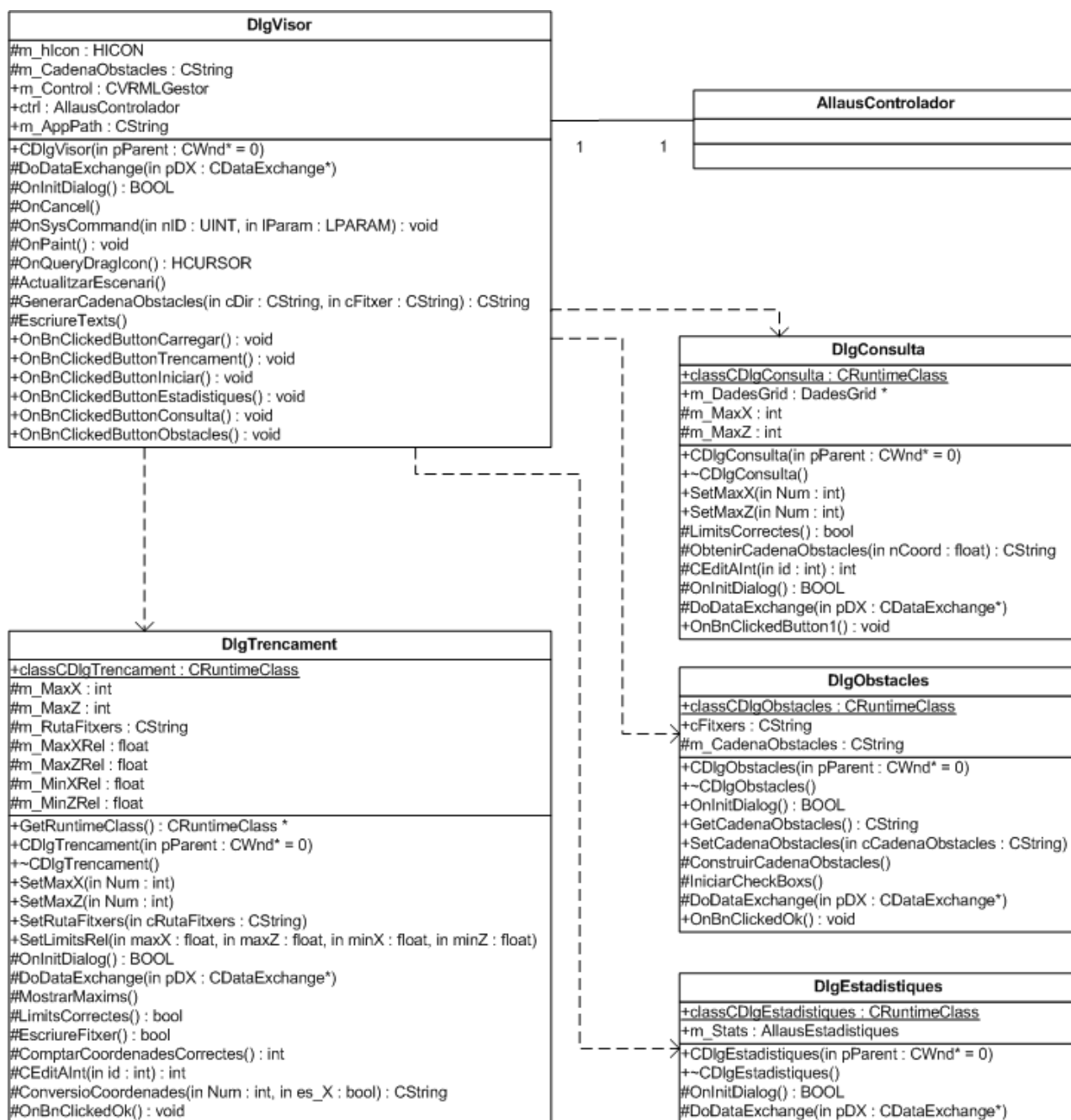


Figura 5.12 – Diagrama de classes 6: Interfície d'usuari

6. DISSENY I IMPLEMENTACIÓ

En aquest capítol descriurem les funcionalitats de l'aplicació que s'ha desenvolupat, explicarem com s'han implementat (en base al modelatge de l'autòmat cel·lular) i la manera en que són presentades a l'usuari.

6.1. Procés

Abans d'entrar en els detalls del disseny cal explicar quin és el procediment que ha de seguir l'usuari per dur a terme una simulació d'un fenomen d'allau de placa amb èxit.

No pot haver simulació sense dades, això sembla bastant obvi. El primer pas que haurà d'efectuar l'usuari sempre que vulgui emprar l'aplicació és, doncs, generar l'escenari on es desenvoluparà l'acció. Aquesta tasca la realitzarà seleccionant la ubicació en el disc o xarxa dels fitxers que emmagatzemen les capes de dades georeferenciades de l'escenari que vol emprar. El directori haurà de contenir obligatòriament les 3 capes principals: alçades, gruixos i característiques del sòl, per a que l'operació es pugui completar; en aquest cas se li oferiran 3 noves funcionalitats a l'usuari: a) afegir capes d'obstacles (opcionals); b) generar el desencadenament de l'allau, que com ja hem explicat, es tracta d'indicar en quina ubicació de l'escenari s'iniciarà, si es dona el cas, l'allau; i, per últim, c) consultar la informació d'una parcel·la de l'escenari.

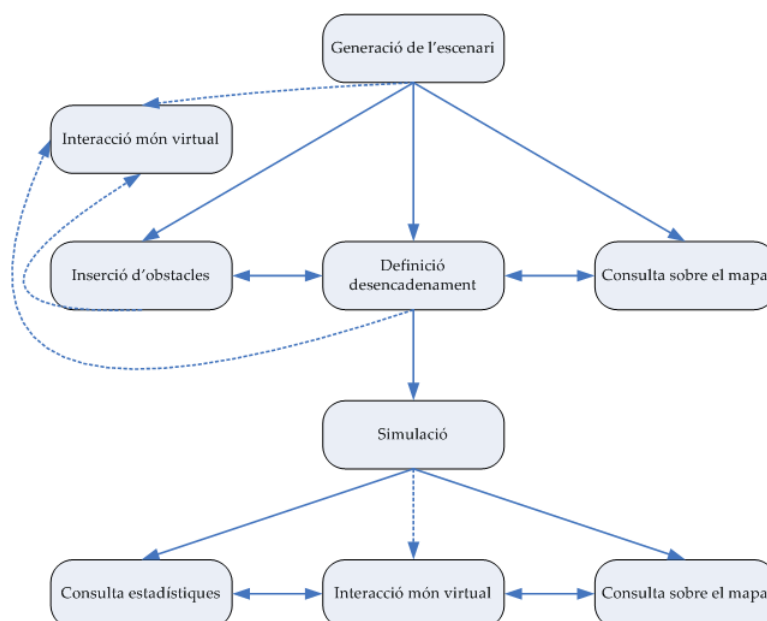


Figura 6.1 – Curs natural de l'aplicació

La simulació no es podrà realitzar si no s'ha generat l'escenari amb les 3 capes principals i no s'ha definit el desencadenant de l'allau.

Quan tingui la possibilitat, l'usuari podrà iniciar la simulació i finalitzada aquesta, es mostraran els resultats, tant visualment, mitjançant realitat virtual, com numèricament, mitjançant una taula d'estadístiques.

D'ara en endavant, fins a final de capítol, trobarem en cursiva notes rellevants referents a la implementació de l'aplicació.

6.2. Creació de l'escenari

Per tal de dur a terme la simulació, el primer pas, com hem dit, és el de la creació de l'escenari on transcorrerà l'acció. Per aquesta tasca és necessari incorporar al simulador 3 capes de dades SIG en format raster: alçades, gruixos i tipus de terreny superficial.

El fitxer de document de la capa d'alçades és la que definirà les propietats del grid i que tota capa posteriorment inserida al sistema haurà de respectar.

Aquestes propietats són les següents:

- Columnes de la malla.
- Files de la malla.
- Unitats de referència.
- Llargada del costat de cel·la.
- Coordenada mínima i màxima en l'eix X (columnes).
- Coordenada mínima i màxima en l'eix Y (files).

Les capes SIG han de ser inserides en el sistema mitjançant fitxers en format IDRISI32, per tant per cadascuna hauran d'existir dos fitxers: el fitxer de dades (amb extensió .img) i el document de les dades (amb extensió .doc).

Cal seguir els següents requisits en quant al sistema de fitxers d'aquestes 3 capes:

- El nom dels fitxers de dades i de documentació haurà de ser el mateix per ambdós i només en variarà l'extensió.
- Tots els fitxers hauran de situar-se en el mateix directori.
- El nom dels fitxers de la capa d'alçades serà el mateix que el nom del directori, i tanmateix, serà el prefix de la resta de fitxers.

- El sufix de la capa de gruixos ha de ser ‘_gruixos’, mentre que la capa de tipus de terreny ha de ser ‘_terreny’.

Exemple:

```
\cata100\  
cat100.doc - cat100.img  
cat100_gruixos.doc - cat100_gruixos.img  
cat100_terreny.doc - cat100_terreny.img
```

Per tal d’inserir les 3 capes principals (i obligatòries), només caldrà que l’usuari seleccioni el directori contenidor de tots els fitxers referents a un *mapa*.

Per les capes d’obstacles, de les que ja en parlarem més endavant, els fitxers també han de seguir els mateixos requisits.

Seleccionat el directori, la primera capa en ser processada per l’aplicació serà la d’alçades, que mitjançant el fitxer de documentació generarà la malla *DadesGrid* i hi afegirà els valors de les d’alçades que donaran forma al relleu de l’escenari. Els valors que trobarem en el fitxer de dades seran les alçades de cada cel·la referenciades per un índex creixent de 0 a $N-1$, on N és el nombre de cel·les del grid. La lectura s’efectua per files.

m_Map és el membre de la classe *DadesGrid* que emmagatzema aquestes dades, representades en un vector de nombres reals.

Per les altres dues capes (gruixos i tipus de terreny superficial) es verifica que les respectives documentacions compleixen els requisits anteriorment mencionats i es procedeix a llegir i afegir aquesta informació addicional del relleu a l’escenari.

El fitxer de dades de la capa de gruixos contindrà l’alçada del gruix de la capa de neu de placa sobre cada parcel·la de la superfície. Notis que aquest gruix només fa referència a la neu de placa o ‘neu movable’, el gruix de la neu compacta subjacent ja és inclosa en la pròpia capa d’alçades.

El fitxer de dades de la capa de tipus de terreny contindrà un identificador per cada cel·la de la malla, que fa referència a un tipus de terreny subjacent ja conegut pel sistema. Aquest serà un valor important en el comportament del lliscament de la massa de neu en la simulació ja que cada tipus de terreny subjacent té diferent coeficient de fregament amb la neu de placa.

Els tipus de terreny superficial definits actualment en el simulador són els següents: 0) Neu pols; 1) Neu dura; 2) Gel; 3) Roca; 4) Sorra; 5) Vegetació lleugera; 6) Vegetació mitja; 7) Vegetació densa; 8) Aigua

m_MapDesc és el membre de la classe DadesGrid que emmagatzema gruixos i identificadors de terreny subjacent en un vector d'objectes MapaCapesCella.

L'objecte m_Terrenys, de la classe AllausTerrenys, és el membre de la classe DadesGrid que emmagatzema les propietats dels diversos tipus de terreny subjacent.

Finalitzada la importació de les dades SIG, es genera el fitxer VRML que representa l'escenari a partir de les dades recollides. Aquest fitxer s'emmagatzema a l'arrel del directori contenidor dels fitxers amb el prefix {nom directori} i el sufix '_scene', donant la possibilitat així de poder ser accedit per altres aplicacions o emmagatzemar-lo en disc.

L'encarregat de generar aquest fitxer VRML és el mètode *GenerarCodiGrid* de l'objecte *GeneradorGrid* (heretat per *GeneradorObstacles*), del qual ja en parlarem en la secció de Visualització.

Finalitzat tot el procés, es visualitza l'escenari mitjançant l'actualització del control de Realitat Virtual de la finestra principal de l'aplicació a partir de les dades del fitxer generat en l'últim pas.

6.3. Inserció de capes d'obstacles

Importades les dades del relleu de l'escenari, se li dona a l'usuari la possibilitat d'afegir capes de dades referents als diferents tipus d'objectes que poden haver-hi sobre el relleu.

Aquests objectes o obstacles, poden ser de gran rellevància en la simulació de l'allau donat que afegeixen una força de resistència addicional a la cel·la que pertanyen. Tanmateix, aquests obstacles poden ser destruïts o desplaçats per l'allau, segons l'impacte que reben de la massa de neu en moviment, en aquest cas, durant la simulació, si un obstacle interfereix en el camí de l'allau es calcula la probabilitat de que aquest desapareixi de la cel·la finalitzada l'allau, més tard detallarem el càlcul numèric d'aquest fenomen.

Un tipus d'obstacle queda definit en el sistema de la següent manera:

- Identificador: enter
- Nom: string
- Resistència: real
- Area: real

Tanmateix, per a la importació de dades de fitxers raster i per a la generació gràfica en un món virtual s'han definit els següents atributs.

- Extensió: string (es refereix al sufix dels noms dels fitxers IDRISI32)
- Path_WRL: string (ubicació en disc del fitxer que conté la representació gràfica en format VRML)

En el directori *.\Gràfics* de la implementació del simulador hi disposem els fitxers de representació gràfica per cadascun dels tipus d'objectes creats.

En el simulador, per ara, s'han definit 6 tipus d'obstacle (entre parèntesi el sufix del nom dels fitxers):

- 1) Arbres grans (*_arbre1*)
- 2) Arbres petits (*_arbre2*)
- 3) Casa/Refugi (*_casa*)
- 4) Mur de contenció gran (*_mur1*)
- 5) Mur de contenció petit (*_mur2*)
- 6) *Altres* (*_altres*)

La inserció de nous tipus d'obstacles en el sistema via implementació seria una tasca bastant simple, tot i això, una possible via de continuïtat pel projecte seria la creació d'un editor d'obstacles per tal que l'usuari pogués crear els seus propis objectes i els ubiqués en els seus escenaris. En parlarem en el capítol de treball futur.

6.4. Desencadenament de l'allau

Carregades les dades SIG al sistema i generat l'escenari, l'usuari ha d'indicar la localització on es desencadenarà l'allau. La fractura de la placa es pot introduir de dues maneres: seleccionant una única cel·la o definint una línia que passa per diverses cel·les.

Definides les coordenades es generen els fitxers de documentació i de dades IDRISI32 de tipus vectorial amb el sufix ‘_trenc’ i extensions .dvc (metadades) i .vec (coordenades) al directori del *mapa*. Aquests fitxers, tot seguit, són processats via l’objecte *GeneradorAccessoris*, que permet resseguir, si és el cas, les cel·les que formen part de la línia de trencament per tal de enregistrar-les com a cel·les *de fractura*, sempre que continguin neu de placa, es a dir, quan el valor del seu atribut *gruix* sigui major que zero. Aquestes cel·les passaran a ser de l’estat *Dinàmic*.

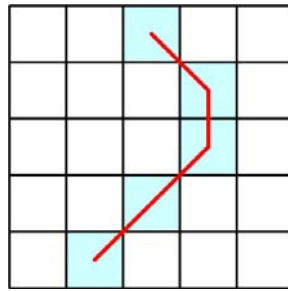


Figura 6.2 – Cel·les de trencament

m_MapDesc és el membre de la classe *DadesGrid* que emmagatzema l’atribut *fractura* i estat en un vector d’objectes *MapaCapesCella*.

Finalitzat el procés, s’actualitza el control de Realitat Virtual de la finestra principal de l’aplicació per tal de mostrar la línia de trencament a través d’una determinada coloració del terreny de les cel·les afectades (veure apartat Visualització).

6.5. Simulació

6.5.1. Fase de propagació

Introduïdes les capes de dades SIG de relleu (obligatòries) i d’obstacles (opcionals), i definida una fractura sobre una capa de neu de placa, es pot iniciar el procés de simulació, el qual consta de dues etapes: la fase de propagació i la fase de lliscament, de la qual en parlarem en el següent apartat.

La primera fase de la simulació és la d’estendre la fractura de la neu de placa. L’usuari ja ha seleccionat el vector inicial de trencament i ara, donat que es perd la força de cohesió entre la massa de neu superior i inferior d’aquest vector, es propaga lateralment el trencament de la placa vessant avall.

A la classe *AllausEstructures* comptem amb un parell de llistes (*Llista de Propagació* i una altra d’auxiliar) d’objectes *AllausCella* per emmagatzemar les cel·les que propaguen el

trencament. La classe *AllausCella* representa un punt del mapa i emmagatzema la informació de *coordenada* i *alçada* de la cel·la.

Donat que tenim les coordenades inicials del trencament, creem un objecte *AllausCella* per cada casella de trencament i l'afegim a la llista (no ordenada) principal. En aquest cas només ens cal emmagatzemar la coordenada de la cel·la. La llista auxiliar, de les mateixes característiques que la anterior, serveix per emmagatzemar les cel·les que en la següent iteració seguiran propagant el trencament.

Simplificadament, el procés de propagació és el següent:

Expressió 6.1 – Fase de propagació

mentre *Llista de propagació* **no** buida
 mentre *Llista de propagació* **no** buida
 Obtenir primer element de la llista.
 Obtenir el veí de la cel·la actual amb menor alçada.
 si l'alçada del veí escollit és menor a l'alçada de la cel·la actual **llavors**
 Prenem el veí com a cel·la destí
 si la cel·la destí conté neu de placa i **no** és d'estat *Dinàmic* **llavors**
 Afegir la cel·la destí a la llista auxiliar.
 fsi
 fsi
 Eliminar primer element de la llista.
 fmentre
 Copiar a la llista de propagació el contingut de la llista auxiliar i eliminar tots els elements d'aquesta.
fmentre

6.5.2. Fase de lliscament

Consideracions sobre la naturalesa de les allaus de placa

- Forces de resistència:
 - Fricció de lliscament entre la placa i la neu subjacent o el sòl.
 - Forces de resistència internes de la neu degut a canvis en la cohesió, col·lisions i canvis de la quantitat de moviment.
 - Les friccions de l'allau amb l'aire i amb fluids són insignificants.
- La neu de placa gairebé mai entrarà en suspensió en l'aire.
- L'allau mai arribarà a tenir un comportament de tipus fluid.
- Al interferir amb un objecte, si aquest suporta l'impacte, part de la massa de neu en moviment es pot aturar en la mateixa cel·la.
- Densitat aproximada de la neu (la neu de placa és l'anomenada neu vella, compacta i ben cohesionada internament):

| Tipus de neu | Densitat (en kg/m ³) |
|--|----------------------------------|
| <i>neu fresca molt freda</i> | 20 |
| <i>neu fresca normal</i> | 80-100 |
| <i>neu en partícules reconeixibles</i> | 180-200 |
| <i>grans fins</i> | 250-350 |
| <i>neu vella</i> | 500 |
| <i>gel</i> | 920 |

Taula 6.1 – Densitat de la neu [1]

Canvis d'estat en la fase de lliscament

Després de la propagació de la fractura en una placa, donada la pèrdua de cohesió respecte a la massa de neu q l'envolta, aquesta perd l'equilibri que la sustentava i comença a lliscar vessant avall sempre que s'hi donin les condicions propícies. Aquest fenomen no finalitzarà fins que tota la neu torni a aconseguir aquest equilibri.

Com hem explicat, el mapa de l'escenari es divideix en un conjunt de cel·les contenidores, o no, d'una capa de neu de placa. El comportament de la massa de neu el determinarà l'estat de la cel·la en que es troba en un determinat instant de temps. Ens referim a cel·la en estat dinàmic a aquella cel·la que conté un determinat gruix de neu en desequilibri i que per tant està en moviment. Una cel·la en estat estàtic és una cel·la que conté un determinat gruix de neu en equilibri, mentre que una cel·la buida és la que no conté cap gruix de neu de placa. Un *desplaçament* és l'acció de prendre el gruix de neu de placa d'una cel·la origen i afegir-lo en una cel·la destí.

La simulació del fenomen de lliscament constarà d'un conjunt de passos (o iteracions) i no finalitzarà fins que no existeixi cap cel·la en estat *dinàmic*. En cadascun d'aquests passos, es realitzaran una sèrie de *desplaçaments* que modificaran els atributs i l'estat de determinades cel·les.

En un determinat pas, una cel·la en estat *dinàmic* pot: a) canviar a estat *estàtic*, si el moviment que porta la capa de neu que conté no te prou força com per seguir avançant, b) canviar a estat *buit*, si la massa de neu que conté té suficient força de desplaçament com per seguir el seu moviment vessant avall, c) romandre en estat *dinàmic*, si la massa que conté te suficient força com per seguir el seu moviment vessant avall i en el següent pas rep un nou gruix massa de neu.

Una cel·la en estat estàtic pot: a) canviar a estat *dinàmic*, si rep massa de neu d'una cel·la veïna, en aquest cas el gruix de neu rebut s'afegirà al gruix estàtic que ja contenia, b) romandre en estat *estàtic*, si no es veu afectada per l'allau.

Una cel·la en estat *buit* pot: a) canviar a estat *dinàmic*, si rep massa de neu d'una cel·la veïna, b) romandre en estat *buit*, si no es veu afectada per l'allau.

Les cel·les *dinàmiques* tindran un paper actiu en el control de la simulació, mentre que les cel·les buides i estàtiques romandran passives fins que no canviïn a *Dinàmic*.

La simulació del fenomen de lliscament l'aconsegurem mitjançant la translació de la massa de neu de tota cel·la *dinàmica* fins que arribi un instant n , en que no existeixi cap cel·la en estat *dinàmic* en la malla.

Cada iteració és compon de dues parts: primerament s'executa la fase de càlculs, en la qual s'enregistren tots els moviments que s'han de produir a final de pas, i en una segona etapa, s'apliquen tots els canvis de valors i d'estat a les cel·les del grid.

Fase de càlcul

En la fase de càlcul, per cada cel·la *dinàmica* present en el mapa, es realitza el següent procés:

- S'obté la direcció (sentit) en que s'està desplaçant la massa de la cel·la.
 - o En la 1^{era} iteració, aquesta direcció és nul·la.
- Es calcula el destí del moviment.
 - o En la 1^{era} iteració, el destí serà la cel·la veïna amb menor alçada.
 - o Per les restants iteracions, el destí serà la cel·la que correspon a la direcció i sentit del moviment o, si existeix basculació, fenomen que explicarem posteriorment, la cel·la esquerra o dreta a la mencionada cel·la respecte el sentit del moviment.
- Si certament existeix destí, es calcula la força de moviment entre les cel·les origen i destí. Si la força és positiva, s'enregistra el desplaçament en una estructura de suport. Per contra, si la força és negativa, es descarta el desplaçament i la cel·la origen passa ser de l'estat *estàtic*.

Determinació del destí

Les cel·les *dinàmiques* de la primera iteració de la fase de lliscament seran aquelles que estiguin dins de l'àrea de fractura fruit del procés de la fase de propagació. A manca d'impuls, el destí del primer desplaçament el dictaminarà, doncs, únicament la força de gravetat, d'aquesta manera la massa de neu lliscarà cap a la cel·la adjacent amb major pendent respecte de l'origen, és a dir, a la cel·la veïna amb menor alçada, donat que la força d'impulsió serà major cap aquella direcció que cap a les altres. En el cas que no existeixi cap cel·la adjacent amb menor alçada que l'origen, no hi haurà destí

possible per al moviment i, per tant, no es produirà el desplaçament, modificant-se l'origen a estat *estàtic*.

La determinació del destí per a les següents iteracions es realitzarà de forma diferent. La cel·la origen contindrà una massa en moviment amb una determinada força cap una direcció i sentit concrets en aquell instant, per tant, el destí serà la cel·la veïna que quedi en aquesta direcció respecte de l'origen (destí natural), excepte si es produeix una desviació.

Una desviació de la direcció de la massa del destí natural es produeix segons unes determinades condicions:

- Canvi de trajectòria cap a l'esquerra:

Expressió 6.2 – Canvi de trajectòria cap a l'esquerra

$$h_e < h_c < h_d$$

- Canvi de trajectòria cap a la dreta:

Expressió 6.3 – Canvi de trajectòria cap a la dreta

$$h_e > h_c > h_d$$

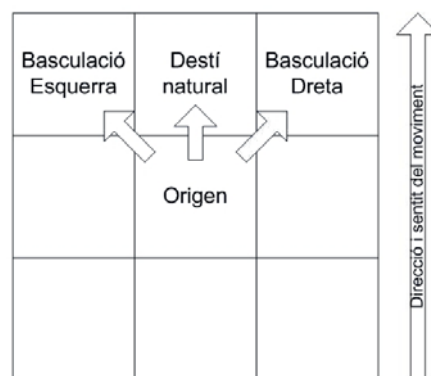


Figura 6.3 – Canvis de trajectòria

Força impulsora

La força impulsora és la única força a favor del pendent. Recordem tot seguit el càlcul d'aquesta. L'explicació i justificació de l'ús d'aquestes formules la podem trobar en el capítol de Modelatge.

La força d'impulsió és el pes del bloc de neu de placa pel sinus de l'angle del pendent entre la cel·la origen i la cel·la destí:

$$F_I = 9,81 \cdot s^2 \cdot h' \cdot \rho \cdot \sin \arctan \frac{h_{origen} - h_{desti}}{s} \cdot \frac{180}{\pi}$$

On:

- s és la grandària del costat de cel·la del grid.
- h' és el gruix de neu.
- ρ és la densitat mitja de la massa de neu.
- h_{origen} és l'alçada (punt central) de la cel·la origen.
- h_{desti} és l'alçada (punt central) de la cel·la destí.

Força de resistència per fricció

La primera de les tres forces de resistència, i la més important que es calcula, és la força de fregament entre la massa de neu i la superfície. Recordem el càlcul d'aquesta.

$$F_{R1} = \mu \cdot 9,81 \cdot s^2 \cdot h' \cdot \rho \cdot \cos \arctan \frac{h_{origen} - h_{desti}}{s} \cdot \frac{180}{\pi}$$

On μ és el coeficient de fregament entre la neu de placa i el material subjacent.

Nota: La taula 6.2 i les expressions des de la 6.6 fins la 6.13 són hipòtesis sistèmiques.

| Material subjacent | μ |
|--------------------|-------|
| gel | 0,20 |
| neu dura | 0,40 |
| neu pols | 0,50 |
| vegetació suau | 0,60 |
| vegetació mitja | 0,65 |
| grava fina | 0,70 |
| vegetació densa | 0,80 |
| grava grollera | 0,90 |

Taula 6.2 – Coeficients de fregament

Força de resistència interna

La segona força de resistència de l'allau és l'anomenada força de resistència per col·lisió o per canvis de cohesió. Hem tractat aquesta resistència com una penalització a la força impulsora.

Expressió 6.6 – Força de resistència interna

$$F_{R2} = F_I - F_I \cdot 0,05$$

Força de resistència dels obstacles

Per cada obstacle present en una cel·la es realitzen els següents càlculs.

Expressió 6.7 – Força de resistència oferta per 1 obstacle

$$\begin{aligned} prop_i &= \frac{A_{obstacle_i}}{A_{cel·la}} \\ F_{impacte_i} &= (F_I - F_{R1} - F_{R2}) \cdot prop_i \\ F_{Robstacle_i} &= \text{MAX}(y_i - F_{impacte_i}, 0) \end{aligned}$$

On:

- $A_{obstacle_i}$ és l'àrea de l'obstacle i .
- $A_{cel·la}$ és l'àrea de cel·la del grid.
- y_i és el coeficient de resistència definit per l'obstacle i .

La força de resistència oferta pels conjunt d'obstacles de la cel·la és el sumatori de les forces de resistència de cada obstacle.

Expressió 6.8 – Força de resistència oferta per N obstacles

$$F_{R3} = \sum_{i=1}^n F_{Robstacle_i}$$

Força total

L'increment de la força del moviment de la massa de placa en una cel·la c en la iteració i serà la diferència entre la força impulsora i les 3 forces de resistència.

Expressió 6.9 – Força de desplaçament

$$\Delta F(c,i) = F_I - F_{R1} - F_{R2} - F_{R3}$$

Aquest increment de força s'afegirà a la força acumulada que portava la massa de la cel·la c al arribar a l'instant i .

Expressió 6.10 – Força de desplaçament acumulada en l'instant i

$$F(c,i) = \text{MAX}(F(c,i) + \Delta F(c,i), 0)$$

Si la força resultant és positiva, la massa de neu avançarà a la cel·la destí, deixant buida la cel·la d'origen. Si, per contra, la força resultant és 0, la massa s'aturarà en la cel·la actual.

Pèrdues de neu

Es pot donar el cas que part de la massa de neu de la placa en moviment es desvinculi del conjunt de l'allau, perdi velocitat i romanguí estable en una de les cel·les del camí mentre l'allau segueix vessant avall. Aquest fet, en la realitat, normalment es dona en la cua de l'allau.

Degut a aquest fenomen, doncs, no tot el gruix de la neu de l'allau el trobarem a l'àrea de dipòsit, sinó que en podrem trobar en el propi camí de l'allau.

La pèrdua de neu serà una funció inversament proporcional a la velocitat que porti el conjunt de l'allau: com major força de desplaçament porti l'allau en una cel·la del camí, menor serà el gruix perdut en aquesta, i inversament, com menor força més gran serà el gruix de neu que s'hi acumuli.

Expressió 6.11 – Pèrdua de massa de neu

$$perdua = \frac{h'}{10e^{\frac{F}{a}}}$$

On:

- h' és el gruix de neu original de la cel·la.
- F' és la força acumulada + la força calculada $F(c,i)$.
- A és l'àrea de cel·la del grid.

Model d'impacte sobre els obstacles

El model d'impacte sobre els obstacles interactuarà amb el model d'allaus. Definim el grau d'impacte sobre un obstacle com la probabilitat de que aquest desaparegui de la seva ubicació original degut a la força de desplaçament de la massa de l'allau.

Expressió 6.12 – Impacte sobre un obstacle

$$\begin{aligned} prop_i &= \frac{A_{obstacle_i}}{A_{cel·la}} \\ F_{impacte_i} &= (F_i - F_{R1} - F_{R2}) \cdot prop_i \\ F_{Robstacle_i} &= \text{MAX}(y_i - F_{impacte_i}, 0) \end{aligned}$$

$$\%Impacte = \text{MIN}\left(\frac{F_{\text{impacte}}}{y_i}, 0\right)$$

Enregistrament dels moviments

Calculat el destí i la força d'un desplaçament de massa des d'una cel·la origen dinàmica, cal que el sistema enregistri que s'ha de produir aquest moviment i la informació d'aquest per tal de realitzar els canvis de valors i estats en l'escenari en la fase de modificació.

Es disposa d'una llista on, per cada iteració, s'aniran afegint els canvis que s'han de produir. Aquesta estructura s'anomena *Llista de Canvis* i es tracta d'una seqüència d'objectes *AllausCella*. Per cada trasllat emmagatzemarem els canvis que s'han de produir tant en la cel·la origen com en la cel·la destí. La informació necessària per cada cel·la és la següent:

- Coordenada absoluta de la cel·la
- Alçada de la cel·la
- Força acumulada de la massa en moviment continguda en la cel·la origen
- Gruix a desplaçar
- Direcció del moviment
- Tipus: Origen/Destí

Els objectes *AllausCella* s'inseriran en la llista en ordre descendent segons l'alçada de la cel·la.

Fase de modificació

Finalitzats tots els càlculs d'emissió/recepció d'una iteració es modifica el grid segons les dades emmagatzemades en la *Llista de Canvis*.

El procediment és el següent:

Expressió 6.13 – Fase de modificació

mentre *Llista de Canvis* **no** buida.

Obtenir primer element de la llista.

si *Tipus* = origen **llavors**

Es resta la força acumulada en la cel·la

Es resta el gruix desplaçat en la cel·la

La cel·la passa a estat Buit.

sino

S'incrementa la força acumulada en la cel·la

S'incrementa el gruix desplaçat en la cel·la

La cel·la passa a estat Dinàmic.

fsi

Eliminar primer element de la llista.

fmentre

6.6. Consulta d'una cel·la

L'aplicació permet realitzar consultes sobre la informació de qualsevol cel·la del terreny. Per aquesta tasca és necessari que l'usuari introdueixi la seva posició relativa en la malla a partir de la coordenada X (files) i la coordenada Y (columnes). La consulta estarà limitada a les dimensions del grid.

La informació que es podrà visualitzar és l'alçada, el gruix de la neu de placa, l'estat i una llista dels obstacles que conté la cel·la. Les dues primeres es mostraran en les unitats de referència de la malla, determinades pel document de les dades de la capa d'alçades, mentre que l'estat de la cel·la pot ser un dels següents:

- Dipòsit: La cel·la conté neu de placa provinent d'una allau.
- Estàtica: La cel·la conté neu de placa que no ha participat en una allau.
- Camí: La cel·la forma part del camí de l'allau simulat, es a dir, en almenys un pas de la simulació, la cel·la ha contingut massa de neu de placa. És possible que pugui contenir un mínim gruix de neu provinent de les pèrdues de massa de l'allau pel camí.
- Buida: La cel·la no conté cap gruix de neu de placa i no forma part del camí.
- Lliscant: La cel·la conté neu de placa que està en moviment (aquest estat només es podria mostrar en cas d'ampliació del simulador, si es permetés aturar la simulació abans de que hagi finalitzat)

Es poden realitzar consultes sobre el mapa tant abans com després de la simulació.

6.7. Estadístiques

6.7.1. Definicions

Finalitzada la simulació es pot consultar un recull de dades referents a l'allau:

- 1) Distància màxima recorreguda: Distància horitzontal entre el punt de fractura més alt i el punt de dipòsit més baix mesurat en metres.

- 2) Desnivell màxim superat: Distància vertical entre el punt de fractura més alt i el punt de dipòsit més baix mesurat en metres.
- 3) Pendent màxim: Angle de desnivell màxim que s'ha trobat l'allau en el seu camí.
- 4) Pendent mínim: Angle de desnivell mínim que s'ha trobat l'allau en el seu camí. S'expressen en negatiu els pendents desfavorables a la naturalesa de l'allau.
- 5) Massa transportada: Quantitat de massa total mobilitzada.
- 6) Massa en dipòsit: Quantitat de massa mobilitzada que ha arribat a l'àrea de dipòsit.
- 7) Massa perduda: Quantitat de massa mobilitzada que s'ha quedat en el camí de l'allau.
- 8) Força màxima: Màxima força d'impulsió que ha assolit la massa de neu, o part d'aquesta massa, durant el transcurs del fenomen.
- 9) Velocitat màxima: Màxima velocitat que ha assolit la massa de neu, o part d'aquesta massa, durant el transcurs del fenomen, calculat en m/s.
- 10) N° de passos: Nombre d'iteracions necessàries per concloure la simulació.

6.7.2. Càlcul

S'ha tractat de que la recopilació de dades estadístiques interfereixi el menys possible en el rendiment del programa en execució. Algunes són recaptades durant la simulació i d'altres al finalinalitzar-se.

Pel càlcul de *Distància màxima recorreguda* (1) i *Desnivell màxim superat* (2) és necessari conèixer quina és la cel·la de fractura més elevada i quina és la cel·la de dipòsit de menor alçada. La primera dada s'obté durant la fase de propagació de la fractura. En concret, s'emmagatzema coordenada i alçada de la cel·la de fractura més alta en la primera iteració de la fase de propagació, és a dir, la més alta de les que ha definit l'usuari com a fracturades. La segona cel·la necessària per a realitzar el càlcul s'obté al finalitzar la fase de lliscament, prenent coordenada i alçada de la cel·la de menor alçada entre aquelles que han acabat en estat *Estàtic* la simulació.

Expressió 6.14 – Cota alta i baixa de l'allau

$$\begin{aligned} \forall i: h_{max} &= \text{MAX}(h_{max}, h_i) \mid \text{si } h_i = h_{max} \rightarrow c_{max} = c_i \\ \forall j: h_{min} &= \text{MIN}(h_{min}, h_j) \mid \text{si } h_j = h_{min} \rightarrow c_{min} = c_j \end{aligned}$$

Conegudes aquestes dues cel·les, *Distància màxima recorreguda* (1) és la distància euclidiana entre ambdues multiplicat per la longitud del costat de cel·la.

Expressió 6.15 – Distància màxima recorreguda

$$D_{max} = \sqrt{(c_{x_i} - c_{x_j})^2 + (c_{y_i} - c_{y_j})^2}$$

Desnivell màxim (2) és la diferència d'alçades entre les dues cel·les.

Expressió 6.16 – Màxim desnivell

$$M_{max} = h_i - h_j$$

Pendent màxim (3) i *Pendent mínim* (4) s'actualitzen, si es dona el cas, durant la fase de lliscament, quan es coneixen les cel·les origen i destí d'un trasllat de neu.

Expressió 6.17 – Pendants màxim i mínim

$$p = \frac{h_{origen} - h_{desti}}{UnitDist}$$

$$p_{max} = \text{MAX}(p_{max}, p)$$

$$p_{min} = \text{MIN}(p_{min}, p)$$

Els pendants els expressem en graus:

Expressió 6.18 – Angle d'un pendent

$$\partial = \tan p \cdot \frac{180}{\pi}$$

Massa transportada (5) és calculada al final de la fase de lliscament. Es comptabilitzen tots els gruixos de neu de placa que han estat implicats en l'allau, tant si romanen en el camí de l'allau com si es troben en l'àrea de dipòsit (cel·les estàtiques). Conegut el gruix total es multiplica a l'àrea de la cel·la i per la densitat de la neu de placa per obtenir el total de la massa transportada.

Expressió 6.19 – Gruix mig de neu transportada

$$\forall i: h'_{total} = h'_{total} + h'_i$$

On *i* és una cel·la en estat = Estàtic i Camí = cert.

Expressió 6.20 – Massa transportada

$$m = h'_{total} \cdot A_{cel·la} \cdot \rho$$

Massa en dipòsit (6) i *Massa perduda* (7) són calculades al mateix temps que *Massa transportada*. Per la primera, només es recull el gruix de neu de les cel·les en estat estàtic

que han format part de l'allau, mentre que per la segona el de les cel·les en estat buit que han format part del camí de l'allau.

Força màxima (8) s'actualitza, si es supera la major força fins al moment registrada, durant la fase de lliscament, en el procés d'enregistrament de trasllat de massa entre una cel·la origen a una cel·la destí. De la mateixa manera, *Velocitat màxima* (9) és enregistrada en el mateix procés, i depèn de la força del trasllat, la massa de neu i l'àrea de cel·la del grid.

Expressió 6.21 – Velocitat màxima

$$v = \frac{F}{h' \cdot \rho \cdot A_{cel\cdot la}}$$

$$v_{max} = \text{MAX}(v_{max}, v)$$

Nº de passos (10) es refereix al nombre de cicles que han transcorregut des del inici de la simulació fins que no queda cap cel·la dinàmica en la llista de dinàmics.

6.8. Disseny de l'interfície d'usuari

En aquesta secció fem una breu descripció del disseny de la GUI de l'aplicació. La interfície d'usuari ha estat creada mitjançant les llibreries MFC de C++, pròpies de l'entorn Windows, això significa que si es volgués portar l'aplicació a un altre sistema, com per exemple Linux, s'hauria de redissenyar la interfície per adaptar-la al nou sistema. En el capítol d'anàlisi, però, ja em explicat que mitjançant una sèrie de mecanismes explicats en l'article *Porting MFC applications to Linux* de Markus Neifer [18], es pot transformar ràpidament la implementació de la interfície en MFC a la llibreria multiplataforma wxWidgets.

6.8.1. Finestra de l'aplicació

La finestra principal de l'aplicació és la que conté el visor del món virtual on es representa l'escenari de la simulació. Mitjançant aquesta, a més a més, es dona accés a totes les funcionalitats del simulador. D'aquesta manera dividim la finestra en dues seccions: l'àrea de funcionalitats i el visor del món virtual.



Figura 6.4 – Finestra principal de l'aplicació

L'àrea de funcionalitats dona accés a les finestres auxiliars de l'aplicació per on l'usuari podrà realitzar peticions o consultes al sistema, mentre que per la segona secció de la

finestra, de major grandària, podrà visualitzar l'escenari on transcorre l'acció. En el següent apartat explicarem els detalls de la representació de l'escenari.

Emprant els botons *Carregar terreny*, *Carregar obstacles*, *Definir fractura*, *Consultar cel·la* i *Estadístiques* l'usuari podrà accedir a les finestres auxiliars de cadascuna de les funcionalitats del simulador. Prement *Iniciar Simulació*, es realitzarà la simulació i finalitzada aquesta s'actualitzarà el visor del món virtual amb la representació de l'allau sobre l'escenari.

Les funcionalitats seran habilitades seqüencialment. Inicialment l'usuari només podrà accedir a *Carregar terreny*. Quan finalitzi aquesta operació podrà fer servir *Carregar obstacles*, *Definir fractura* i *Consultar cel·la*. Quan es realitza la tasca de *Definir Fractura* amb èxit s'habilita, per fi, l'opció d'iniciar la simulació i finalitzada aquesta l'usuari ja podrà consultar les estadístiques de l'allau.

6.8.2. Diàleg 'Carregar escenari'

Quan l'usuari prem el botó *Carregar escenari* de la finestra principal se li demana que seleccioni el directori que conté els fitxers IDRISI32 amb les dades de l'escenari on vol realitzar la simulació. L'elecció del directori es farà mitjançant un arbre de directoris on apareixeran totes les possibles rutes de disc o de xarxa.



Figura 6.5 – Diàleg 'Carregar escenari'

Al seleccionar un directori, si aquest conté els fitxers bàsics per a la generació del terreny, es torna a la finestra principal del programa i s'actualitza el visor del món virtual, el qual contindrà la representació del relleu escollit.

El *diàleg* transmet l'ubicació dels fitxers al *Controlador* i aquest s'encarrega que l'objecte *DadesGrid* importi les dades dels fitxers bàsics. L'objecte *GeneradorGrid* generarà el codi VRML en base a les dades de *DadesGrid*.

6.8.3. Diàleg 'Carregar obstacles'

Quan l'usuari prem el botó *Carregar obstacles* de la finestra principal s'engega un *diàleg* on es mostra tot el conjunt de tipus d'obstacles que es poden incorporar a les dades del simulador. L'usuari només podrà seleccionar les capes detectades en el directori seleccionat mitjançant l'opció anterior: *Carregar terreny*.



Figura 6.6 – Diàleg 'Carregar obstacles'

Escollides les capes d'obstacles que es desitgen incorporar, es retorna a la finestra principal i s'actualitza el món virtual, que ara inclourà els objectes dels tipus seleccionats, si n'hi ha. El *diàleg* transmet les capes seleccionades al *Controlador* i aquest s'encarrega que l'objecte *DadesGrid* importi les dades dels fitxers seleccionats i que l'objecte *GeneradorObstacles* generi el codi VRML en base a les noves dades de *DadesGrid*.

6.8.4. Diàleg 'Punts de trencament'

Quan l'usuari prem el botó *Definir fractura* de la finestra principal s'engega el *diàleg* que li demanarà la localització del desencadenament de l'allau.

L'usuari ha d'introduir les coordenades de les cel·les de l'escenari que iniciaran, si es dona el cas, l'allau. Pot seleccionar una cel·la indicant la seva ubicació mitjançant la coordenada X (files de la matriu) i la coordenada Y (columnes). Pot definir, a més a més, una línia, introduint les coordenades de les cel·les que formen part d'aquestes (màxim 6). La línia es generarà seqüencialment: de la cel·la 1 a la 2, de la 2 a la 3, etc, i englobarà totes les cel·les que es trobin entre les cel·les indicades. L'aplicació no permet

introduir coordenades de cel·les fora del límits de la matriu, emetent un missatge d'error si es dona el cas.

The dialog box 'Punts del trencament' contains a table with 6 rows and 2 columns labeled 'x' and 'y'. To the right of the table are two buttons: 'Aceptar' and 'Cancelar'. Below these buttons are two input fields: 'Màx. X' with the value '150' and 'Màx. Z' with the value '150'.

| | x | y |
|---|---|---|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |

Figura 6.7 – Diàleg 'Punts de trencament'

El diàleg obté els límits de la matriu del objecte *DadesGrid* a través de la classe *Controlador*. La fractura definida serà processada, mitjançant un fitxer vectorial, per l'objecte *GeneradorAccessoris* del *Controlador*.

6.8.5. Diàleg 'Informació de cel·la'

Quan l'usuari prem el botó *Consultar cel·la* de la finestra principal s'engega el següent diàleg:

The dialog box 'Informació de cel·la' features input fields for 'X:' (value 115) and 'Y:' (value 34), followed by a 'Consultar' button. Below this is a table displaying cell information.

| Alçada | 2928.400 |
|-----------------|------------|
| Gruix | 0.000 |
| Tipus de cel·la | Camí |
| Obstacles | Arbre gran |

Figura 6.8 – Diàleg 'Informació de cel·la'


Mitjançant aquesta finestra l'usuari podrà consultar l'informació de qualsevol cel·la de l'escenari. Només cal que indiqui les coordenades de la cel·la que desitgi i al prémer el

botó *Consultar* s'actualitzaran els controls de text inferiors: Alçada del relleu, gruix de la neu, estat de la cel·la; i la llista dels obstacles que conté.

Aquesta finestra és accessible una vegada s'ha generat l'escenari. El *diàleg* obté tota la informació de l'objecte *DadesGrid* a través de la classe *Controlador*.

6.8.6. Diàleg 'Estadístiques'

Prement el botó *Estadístiques* de la finestra principal l'usuari podrà consultar la informació de l'allau.



| Estadístiques | | |
|------------------------------|----------|------------------|
| Màxima distància recorreguda | 848.53 | m |
| Desnivell superat | 504.80 | m |
| Massa transportada | 3750.00 | kg |
| Massa de neu en dipòsit | 3683.75 | kg |
| Massa de neu perduda | 66.25 | kg |
| Força màxima | 36496.50 | N |
| Acceleració màxima | 4.26 | m/s ² |
| Màxim pendent | 55.03 | ° |
| Mínim pendent | -2.75 | ° |
| Nº de passos | 16 | |

Figura 6.9 – Diàleg 'Estadístiques'

El *diàleg* obté la informació de l'objecte *AllausEstadístiques* del motor a través de la classe *Controlador*. Aquesta finestra és accessible una vegada s'ha finalitzat el procés de simulació.

6.9. Representació de l'escenari

Per a la representació gràfica de l'escenari en tres dimensions s'ha emprat la tecnologia VRML. Per a la construcció, o actualització, del món virtual el procés que es segueix, simplificadament, és el següent: primerament, es genera un fitxer (amb extensió .wrl) amb la traducció de les dades del grid a codi VRML i, posteriorment, s'executa aquest fitxer en el control de visualització de móns virtuals Cosmo Player 2.1 de *Computer Associates* ubicat en la finestra principal de l'aplicació. Finalitzat el procés l'usuari ja podrà interactuar amb el món generat.

ElevationGrid és el node VRML que implementa un malla de relleu. Per al seu funcionament cal establir, principalment, les seves dimensions, el nombre de cel·les i la seva resolució i, per a cada cel·la, definir la seva alçada i coloració en el sistema RGB.

La representació del relleu es realitza de forma continua, així, l'alçada real de cada cel·la la trobem en el seu punt mig, mentre que pels restants punts aquest valor s'obté mitjançant interpolació amb les cel·les veïnes. D'aquesta manera, com menor sigui el nivell de detall del grid més suau serà la representació gràfica del relleu.

Per a la tasca de generació del codi VRML s'ha emprat una llibreria de classes (que forma part del projecte *VirtualLands* del grup d'investigació de simulació de la UPC) que implementava quasi la totalitat del seu procés, si bé, s'han hagut d'estendre algunes d'aquestes classes per tal d'afegir detalls propis de la representació d'un simulador d'allaus.

Explicuem, a continuació, algunes de les particularitats del disseny del món virtual interactiu on l'usuari podrà visualitzar l'escenari de la simulació.

Representem l'escenari en una malla en 3 dimensions, on les columnes de l'autòmat es troben en l'eix de les abscises x , les files en l'eix de les ordenades z i el valor de l'alçada de cada cel·la en l'eix vertical y . L'escala d'aquest últim ha estat augmentada per tal de millorar l'apreciació dels pendents del relleu. La proporció amb els altres eixos és de 1/2.5.

El control de representació afegeix en el marge inferior una barra de tasques per a la navegació en l'escenari. Les accions que es poden realitzar són: zoom, rotar, desplaçar, inclinar, anar i lliscar. A més a més, comptem amb la possibilitat de simular la força de la gravetat sobre el punt de vista pel que disposarem de dos modes: caminar o volar.

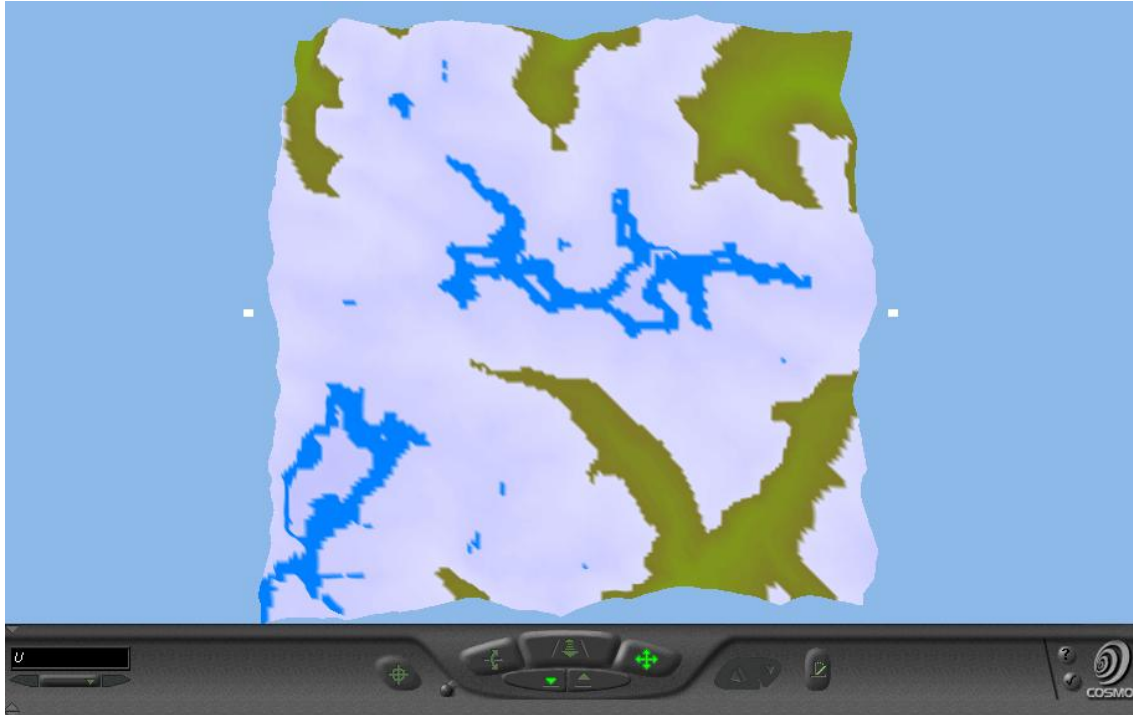


Figura 6.10 – Vista inicial del món virtual

La coloració de la malla tindrà un paper fonamental en la representació tant de l'escenari com dels efectes de l'allau.

En l'escenari, a simple vista, podrem comprovar l'alçada de la cota de neu. Tota cel·la la qual el seu tipus de terreny sigui neu pols, neu dura o gel, serà representada en color blanc degradat a blau segons l'alçada de la cel·la.

Expressió 6.22 – Components RGB de la coloració d'una cel·la amb contingut de neu o gel

$$\begin{aligned}
 NumColors &= 25 \\
 EscalaColor &= \frac{Alçada_{cel·la} \cdot (NumColors - 1)}{Alçada_{màxima}} \\
 R &= \frac{(NumColors - EscalaColor) \cdot 0.25}{NumColors} + 0.75 \\
 G &= \frac{(NumColors - EscalaColor) \cdot 0.25}{NumColors} + 0.75 \\
 B &= 1
 \end{aligned}$$

Els restants tipus de terreny es representaran en verd degradat a marró com major sigui l'alçada de la cel·la.

Expressió 6.23 – Components RGB de la coloració d'una cel·la sense contingut de neu o gel

$$\begin{aligned} \text{NumColors} &= 25 \\ \text{EscalaColor} &= \frac{\text{Alçada}_{\text{cel·la}} \cdot (\text{NumColors} - 1)}{\text{Alçada}_{\text{màxima}}} \\ R &= \frac{1}{2} \\ G &= 0.8 - \frac{\text{EscalaColor}}{\text{NumColors}} \cdot 0.6 \\ B &= \frac{\text{EscalaColor}}{\text{NumColors}} \cdot 0.3 \end{aligned}$$

En blau intens es representen les cel·les que contenen neu *movible*.

Expressió 6.24 – Components RGB de la coloració d'una cel·la amb contingut de neu de placa

$$R=0 \quad G=\frac{1}{2} \quad B=1$$



Figura 6.11 – Coloració de terrenys

Els fitxers raster d'obstacles indiquen quines posicions de la malla contendran un determinat tipus d'objecte, indicant les seves coordenades x i z . Per tal de poder-los representar gràficament ens caldrà també la seva posició y en el món virtual, que serà el valor de l'atribut *alçada* de les cel·les que els contenen (reescalats). D'aquesta forma aconseguirem que els objectes se situïn sobre el relleu.

La representació dels obstacles en si, es realitzarà mitjançant objectes VRML externs (prototips). Només cal que el fitxer de l'escenari inclogui una referència a la ubicació en disc d'aquests prototips, cada vegada que se'n hagi de representar. Així podrem intercanviar els gràfics referents a un tipus d'objecte substituint tan sols el fitxer del directori pertinent.



Figura 6.12 – Detall dels obstacles



Figura 6.13 – Representació de la fractura inicial

Pel que fa a la fractura definida per l'usuari, es colorejen de vermell les cel·les que formen part de la línia, sempre que aquestes continguin neu *movible*.

Expressió 6.25 – Components RGB de la coloració d'una cel·la de trencament

$$R=1 \quad G=0 \quad B=\frac{1}{2}$$

En quant a la representació de l'allau, sobre el terreny es colorejen les cel·les de fractura (final) en vermell, les cel·les que pertanyen al camí de l'allau en taronja i les que formen la zona de dipòsit en groc.

Expressió 6.26 – Components RGB de la coloració de les cel·les involucrades en l'allau

$$\text{Fractura : } R=1 \quad G=0 \quad B=\frac{1}{2} \quad \text{Camí : } R=1 \quad G=\frac{1}{2} \quad B=0 \quad \text{Dipòsit : } R=1 \quad G=1 \quad B=0$$

Tanmateix, es representa l'elevació del dipòsit, es a dir, l'alçada del dipòsit augmenta respecte a l'alçada original segons el gruix de neu acumulat. Malauradament, donades les dimensions de l'escenari, es difícil apreciar l'elevació del gruix degut a les dimensions de l'escenari.

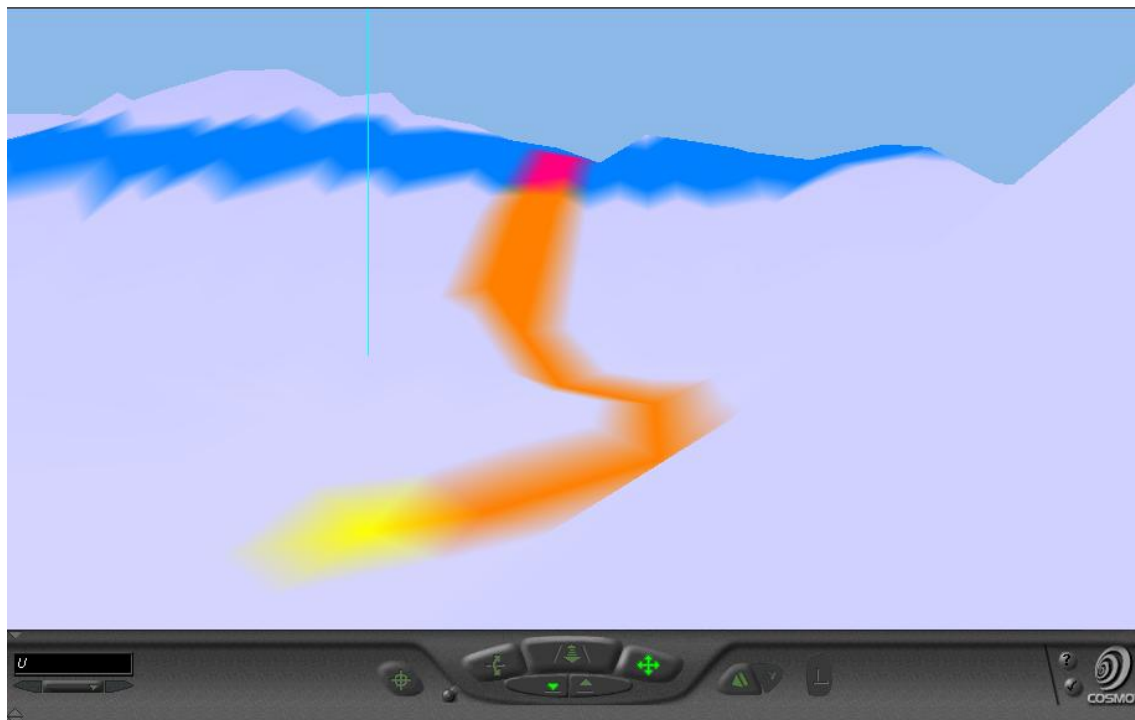


Figura 6.14 – Representació de l'allau en el món virtual



Figura 6.15 – Galeria d'objectes

7. EXPERIMENTACIÓ

7.1. Validació del funcionament

7.1.1. Objectiu de les proves

L'objectiu d'aquest projecte no és el de validar els resultats del model que hem desenvolupat amb la realitat. Aquesta tasca formaria part de l'extensió del projecte, en la qual es requeriria disposar d'informació SIG estrictament exacta, realitzar treball de camp i obtenir la validació de professionals especialitats en el fenomen.

El que si forma part d'aquest projecte és la validació del funcionament del simulador. Comprovarem i demostrarem que l'aplicació s'ha adaptat correctament al model desenvolupat i que els resultats obtinguts s'aproximen a les característiques habituals del fenomen.

Primerament descriurem les característiques principals de l'escenari de proves i veurem les dades més rellevants que hem pogut extreure d'un cas real per tal de comprovar si el model s'aproxima a les característiques típiques del fenomen. Finalment mostrarem el resultat d'un conjunt de simulacions que s'han realitzat per tal de validar que l'aplicació funciona correctament.

Per la majoria de proves comentades, descriurem les característiques de la localització del desencadenament, mostrarem la representació del fenomen simulat, descriurem el camí que ha seguit l'allau i la zona de dipòsit, finalment mostrarem una taula amb les dades més significatives de cada iteració de la simulació i unes gràfiques que ens serviran per reforçar la demostració.

7.1.2. Descripció de l'escenari de proves

L'escenari que s'ha emprat per realitzar les proves de validació del funcionament és correspon en la realitat a una extensió de terreny de 5625 hectàrees que forma part de la comarca de Val d'Aran.

- Àrea de l'escenari: $7.500\text{m} \times 7.500\text{m} = 56,25\text{km}^2 / 5625\text{ha}$
- Alçada màxima: 3.310m
- Alçada mínima: 518m
- Número de files del grid: 150

- Número de columnes del grid: 150
- Número total de cel·les: del grid $150 \times 150 = 22500$
- Llargada del costat d'una cel·la: 50m
- Àrea de la cel·la: $50\text{m} \times 50\text{m} = 2500\text{m}^2$
- La cota de neu està establerta als 1.900m. Per sota d'aquesta cota el tipus de sòl és *Grava grollera i Vegetació suau*.
- La neu de tipus de placa l'hem situat als vessants entre les cotes de 2.800m i 2.900m. El gruix de les plaques de neu és uniforme amb una alçada de 40cm per la majoria de proves.

7.1.3. Valors tipus

Comprovarem que els resultats de les proves s'aproximen als valors estadístics habituals de les allaus [8]:

- L'acceleració de les allaus es produeix, normalment, en pendents superiors al 58% (angle major de 30°).
- La desacceleració es produeix en pendents inferiors al 37% (angle menor de 20°).
- En els trams amb pendent d'entre el 37% i el 58%, l'allau es desplaça a velocitat, més o menys, constant.
- La velocitat màxima que pot aconseguir una allau, segons el tipus de neu és el següent:

| | Petita | Mitjana | Gran |
|-------------------|--------|---------------|---------------|
| Neu humida | <10m/s | 10m/s – 20m/s | 20m/s – 35m/s |
| Neu seca | <10m/s | 10m/s – 35m/s | 35m/s – 60m/s |
| Neu pols | <25m/s | 25m/s – 60m/s | 60m/s – 90m/s |

Taula 7.1 – Velocitats tipus d'una allau [8]

7.1.4. Descripció d'un cas real

Com a informació addicional s'ha disposat, a més a més, de les dades més rellevants d'una allau esdevingut als Pirineus aragonesos, de petites dimensions segons l'autor, extretes de l'article [15] "El alud de Peña Gabarda del dos de mayo de 2001" de Luís Cáncer Pomar, les quals, tot i que no tenim intenció de validar el model, les compararem amb les dades resultants de les proves.

- Zona de sortida: 2.100m
- Zona d'arribada: 1.560m
- Recorregut: 830m

- Recorregut Horitzontal: 625m
- Desnivell: 540m
- Pendent mitja: 86%
- Pendent trams superiors i mig: > 100%
- Pendent tram inferior: < 50%
- Amplada front arribada: 175m
- Gruix màxim de neu mobilitzada: 6m
- Densitat mitja de la neu mobilitzada: 0,63kg/m³

7.1.5. Taula d'iteracions

Emprarem la taula d'iteracions per estudiar el comportament d'un bloc de neu, entenent bloc com la massa de neu que s'anirà traslladant de cel·la en cel·la formant l'allau.

Aquesta taula l'hem extret dels fitxers de resultats que crea l'aplicació per a cada iteració de la fase de lliscament.

A continuació expliquem el significat de cada columna de la taula:

- Pas: número d'iteració de la simulació.
- X: localització de la cel·la dins del grid (fila).
- Y: localització de la cel·la dins del grid (columna).
- Distància: distància des del punt central de la cel·la on es troba el bloc de neu fins al punt central de la cel·la que contenia el bloc de neu abans de produir-se l'allau, en metres.
- Alçada: altitud de la cel·la, en metres.
- Desnivell: diferència de metres entre la cel·la de procedència del bloc i l'actual.
- %D: Percentatge del desnivell.
- F: Força del desplaçament acumulada que duu el bloc de neu.
- Vel.: velocitat aproximada que duu el bloc.
- Acc.: acceleració aproximada que ha sofert el bloc en l'últim pas.
- Gruix: alçada mitja del bloc de neu.

Per avaluar el comportament del model, primerament realitzarem simulacions senzilles, on només es desplaça un bloc de neu de cel·la en cel·la i comprovarem el seu progrés. Les allaus simulades, a més a més, les desencadenarem en el mateix lloc amb l'objectiu de determinar l'efecte d'alguns paràmetres. Més endavant, mostrarem simulacions on actuï més d'una cel·la.

7.1.6. Simulació 1

Descripció:

El primer experiment consistirà en una allau desencadenat per la fractura d'una sola cel·la (50m x 50m) i que recorrerà un camí sense obstacles.

Desencadenant:

Localització: 1 cel·la (112, 33)

Gruix de neu de placa: 40cm

Terreny subjacent: Neu dura

Obstacles: No

Característiques de l'allau:

Terreny subjacent del camí: Neu dura

Màxima distància recorreguda: 743,3m

Desnivell superat: 393,40m

Desnivell màxim: 139%

Desnivell mig: 61%

Desnivell mig tram superior: 108%

Desnivell mig tram inferior: 13%

Massa transportada: 625kg

Massa de neu en dipòsit: 378,75kg

Massa de neu perduda pel camí: 246,25kg

Velocitat màxima: 21,43m/s



Figura 7.1 – Simulació 1: Visualització.

Taula d'iteracions i gràfiques:

| pas | X | Y | Distància | Alçada | Desn. | % D. | F | Vel. | Acc. | Gruix |
|-----|-----|----|-----------|--------|-------|------|---------|-------|-------|-------|
| 0 | 112 | 33 | 0 | 2811,5 | 0 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,5 |
| 1 | 113 | 34 | 61 | 2764,4 | 47,1 | 94% | 1760,6 | 2,82 | 2,82 | 0,5 |
| 2 | 114 | 35 | 122 | 2713,2 | 51,2 | 102% | 3783,9 | 6,33 | 3,52 | 0,478 |
| 3 | 115 | 36 | 182 | 2643,7 | 69,5 | 139% | 6589,7 | 11,19 | 4,86 | 0,471 |
| 4 | 116 | 37 | 243 | 2575,0 | 68,7 | 137% | 9323,9 | 15,90 | 4,71 | 0,469 |
| 5 | 117 | 38 | 304 | 2533,5 | 41,5 | 83% | 10599,3 | 18,12 | 2,21 | 0,468 |
| 6 | 118 | 39 | 365 | 2486,3 | 47,2 | 94% | 12253,5 | 20,95 | 2,83 | 0,468 |
| 7 | 119 | 40 | 426 | 2457,0 | 29,3 | 59% | 12533,9 | 21,43 | 0,48 | 0,468 |
| 8 | 119 | 41 | 487 | 2448,6 | 8,4 | 17% | 10609,4 | 18,17 | -3,25 | 0,467 |
| 9 | 119 | 42 | 547 | 2434,9 | 13,7 | 27% | 9286,9 | 15,98 | -2,20 | 0,465 |
| 10 | 119 | 43 | 608 | 2421,2 | 13,7 | 27% | 7970,0 | 13,83 | -2,15 | 0,461 |
| 11 | 120 | 43 | 669 | 2423,6 | -2,4 | -5% | 4878,9 | 8,73 | -5,10 | 0,447 |
| 12 | 121 | 44 | 730 | 2428,3 | -4,7 | -9% | 1630,3 | 3,30 | -5,43 | 0,395 |
| 13 | 122 | 44 | 791 | 2418,1 | 10,2 | 20% | 188,1 | 0,50 | -2,81 | 0,303 |
| 14 | 122 | 44 | 791 | 2418,1 | 0,0 | 0% | 0,0 | 0,00 | -3,30 | 0,303 |

Taula 7.2 – Simulació 1: Taula d'iteracions

Mitjançant els resultats de la taula d'iteracions i les gràfiques que presentem seguidament podem extreure diverses conclusions:

1.- A manca d'obstacles, la relació entre el desnivell del pendent i l'acceleració és pràcticament proporcional. (figura 7.2)

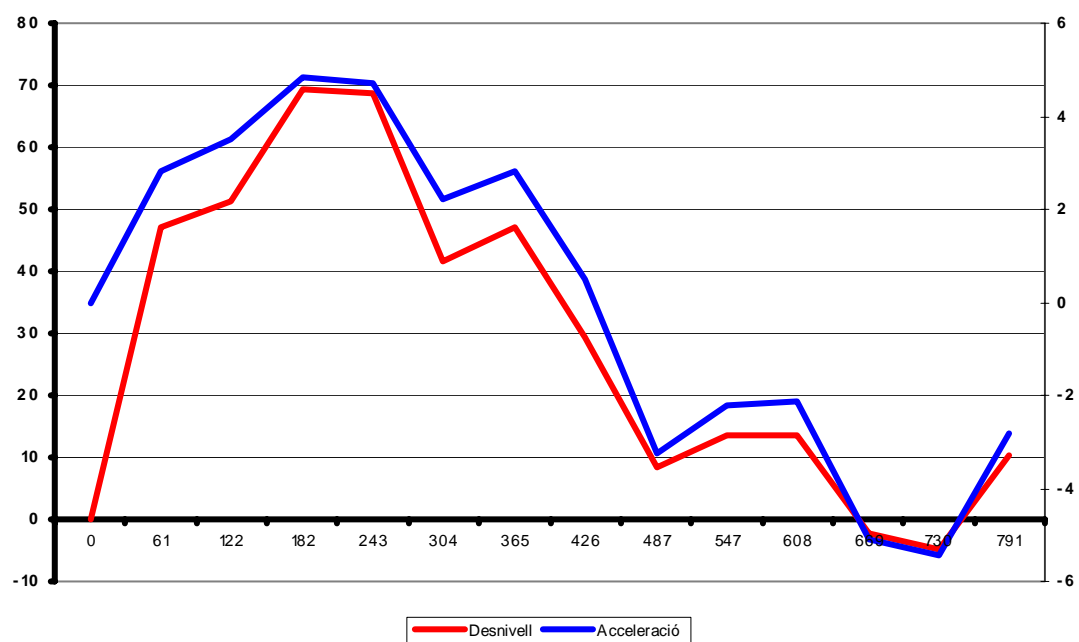


Figura 7.2 – Simulació 1: Desnivell VS Acceleració

2.- La massa de neu va accelerant des del desencadenament fins que troba un pendent almenys inferior al 59%. (figura 7.3)

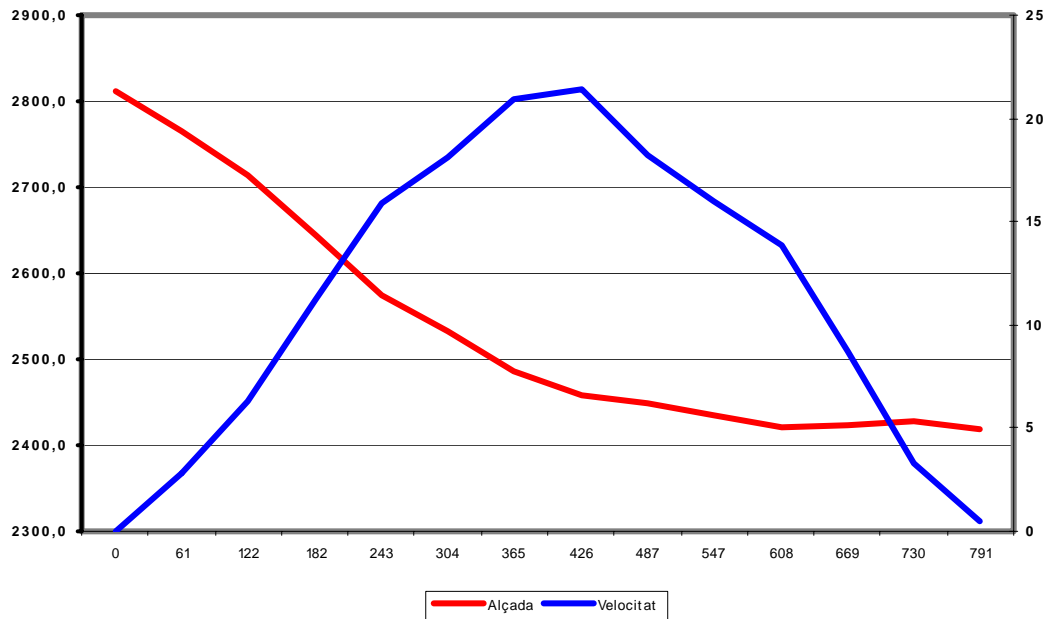


figura 7.3 – Simulació 1: Alçada VS Velocitat

3.- Mentre dura l'acceleració el gruix mig del bloc es va mantenint. És en les cel·les del final del recorregut quan la massa comença a perdre's pel camí. A la zona de dipòsit trobem aproximadament un 60% (30cm de mitja) del total de la massa transportada. (figura 7.4)

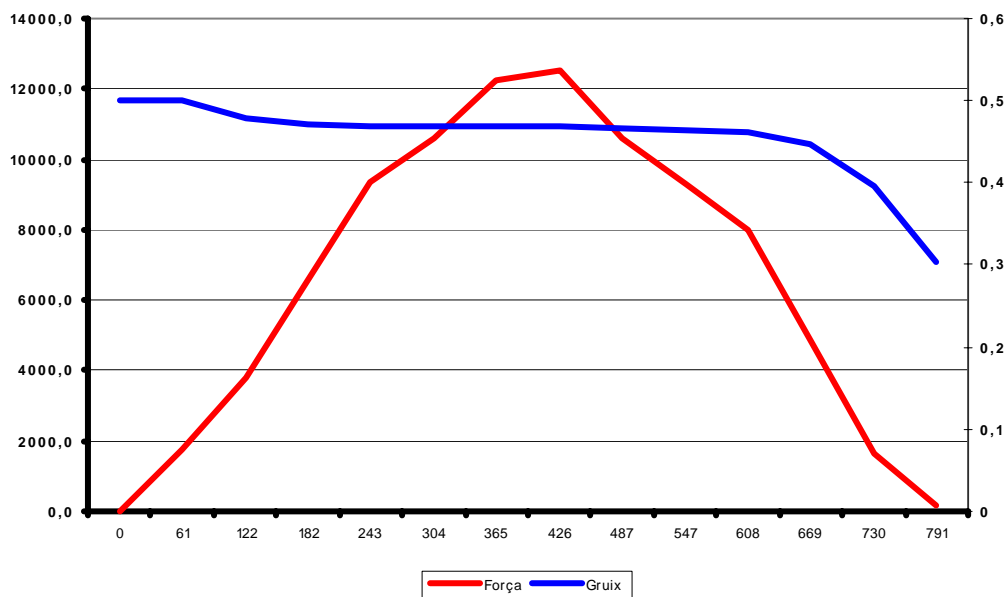


figura 7.4 – Simulació 1: Força VS Gruix

7.1.7. Simulació 2

Descripció:

En aquest cas realitzarem la mateixa prova d'abans amb l'excepció de que afegim obstacles en 5 cel·les del tram mig del camí de l'allau anterior. Els obstacles són arbrats de grans dimensions, el qual haurà de fer disminuir, teòricament, l'acceleració de l'allau.

Desencadenant:

Localització: 1 cel·la (112, 33)

Gruix de neu de placa: 50cm

Terreny subjacent: Neu dura

Obstacles: 5 arbres en el camí de l'allau.

Característiques de l'allau:

Terreny subjacent del camí: Neu dura

Màxima distancia recorreguda: **640,31m**

Desnivell superat: **387,90m**

Desnivell màxim: 139%

Desnivell mig: **71%**

Desnivell mig tram superior: 108%

Desnivell mig tram inferior: **25%**

Massa transportada: 625kg

Massa de neu en dipòsit: **501,25kg**

Massa de neu perduda pel camí: **123,75kg**

Velocitat màxima: **20,95m/s**

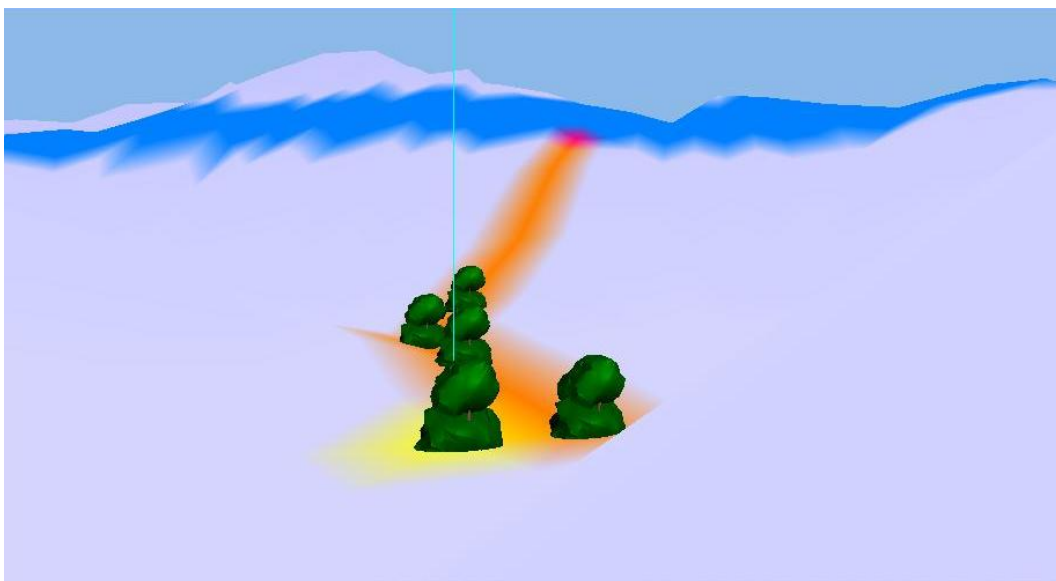


Figura 7.5 – Simulació 2: Visualització.

Taula d'iteracions i gràfiques:

| pas | X | Y | Distància | Alçada | Desn. | % D. | F | Vel. | Acc. | Gruix |
|-----|-----|----|-----------|--------|-------|------|---------|-------|-------|-------|
| 0 | 112 | 33 | 0 | 2811,5 | 0 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,5 |
| 1 | 113 | 34 | 61 | 2764,4 | 47,1 | 94% | 1760,6 | 2,82 | 2,82 | 0,5 |
| 2 | 114 | 35 | 122 | 2713,2 | 51,2 | 102% | 3783,9 | 6,33 | 3,52 | 0,478 |
| 3 | 115 | 36 | 182 | 2643,7 | 69,5 | 139% | 6589,7 | 11,19 | 4,86 | 0,471 |
| 4 | 116 | 37 | 243 | 2575,0 | 68,7 | 137% | 9323,9 | 15,90 | 4,71 | 0,469 |
| 5 | 117 | 38 | 304 | 2533,5 | 41,5 | 83% | 10599,3 | 18,12 | 2,21 | 0,468 |
| 6 | 118 | 39 | 365 | 2486,3 | 47,2 | 94% | 12253,5 | 20,95 | 2,83 | 0,468 |
| 7 | 119 | 40 | 426 | 2457,0 | 29,3 | 59% | 11779,0 | 20,14 | -0,81 | 0,468 |
| 8 | 119 | 41 | 487 | 2448,6 | 8,4 | 17% | 9090,0 | 15,61 | -4,53 | 0,466 |
| 9 | 119 | 42 | 547 | 2434,9 | 13,7 | 27% | 6952,2 | 12,09 | -3,51 | 0,46 |
| 10 | 119 | 43 | 608 | 2421,2 | 13,7 | 27% | 5649,5 | 10,04 | -2,05 | 0,45 |
| 11 | 120 | 43 | 669 | 2423,6 | -2,4 | -5% | 1745,1 | 3,48 | -6,56 | 0,401 |
| 12 | 120 | 43 | 669 | 2423,6 | 0,0 | 0% | 0,0 | 0,00 | -3,48 | 0,401 |

Les cel·les assenyalades són les que contenen arbrat

Taula 7.3 – Simulació 2: Taula d'iteracions

1.- El desnivell total superat per l'allau és superior al de l'anterior simulació ja que el recorregut ha resultat ser més curt.

2.- L'allau ha recorregut aproximadament 122 metres (2 cel·les) menys que abans degut a que els obstacles han afegit una important força de resistència a l'allau. Tot i això l'allau quasi aconsegueix sobrepassar la zona arbrada. (figura 7.6)

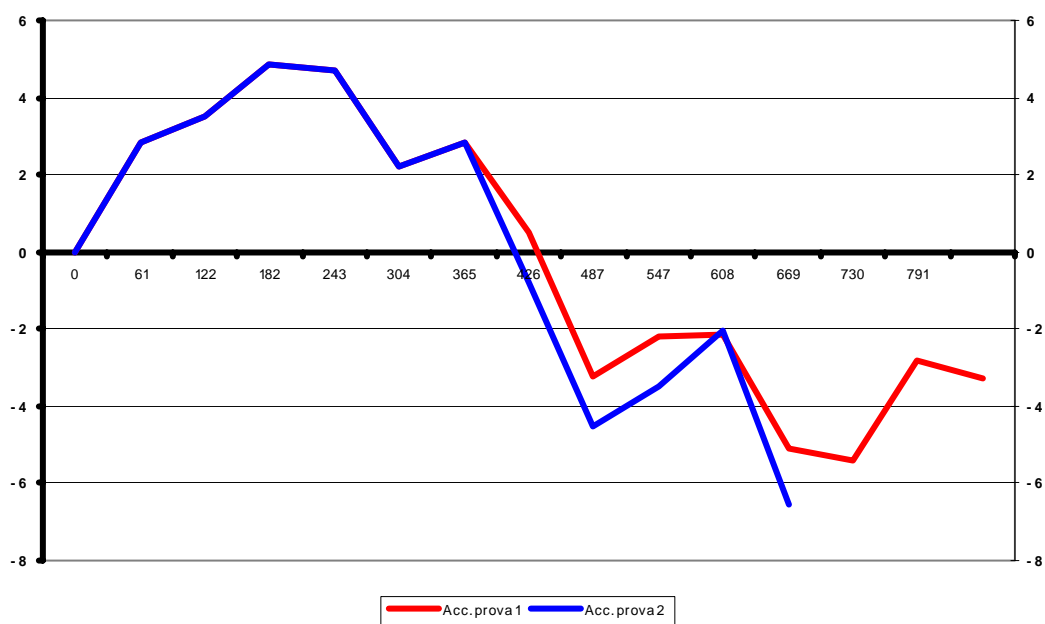


figura 7.6 – Acceleració Sim.1 VS Acceleració Sim.2

3.- En aquest cas, la desacceleració s'ha iniciat en pendents lleugerament superiors al 59%, quan ha començat a trobar obstacles pel camí. (figura 7.7)

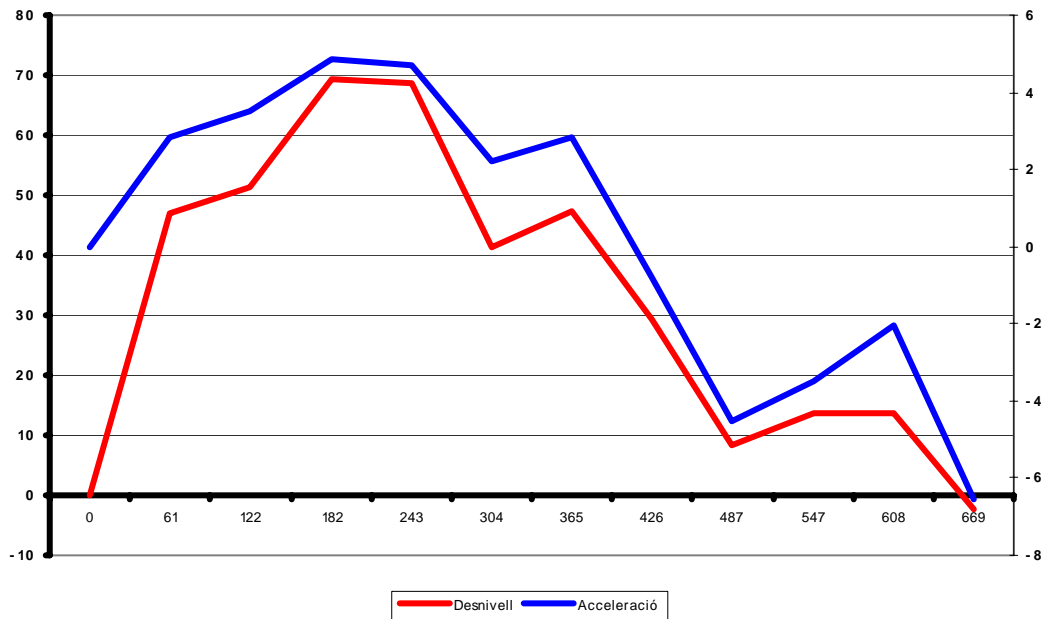


figura 7.7 – Simulació 2: Desnivell VS Acceleració

4.- No s'ha aconseguit igualar la velocitat màxima anterior degut a que la cel·la on s'havia produït, en la primera prova, en aquest cas ha estat de desacceleració.

5.- L'impacte que han sofert els arbres ha estat lluny d'arrancar-los. La següent taula mostra el grau d'impacte sobre els arbres de cada cel·la. Tanmateix demostra que aquest valor és proporcional a la força de desplaçament de la massa sobre la cel·la.

| pas | X | Y | F | Impacte |
|-----|-----|----|---------|---------|
| 6 | 118 | 39 | 12253,5 | 24,5% |
| 7 | 119 | 40 | 11779,0 | 23,6% |
| 8 | 119 | 41 | 9090,0 | 28,2% |
| 10 | 119 | 43 | 5649,5 | 11,3% |
| 11 | 120 | 43 | 1745,1 | 3,5% |

Taula 7.4 – Simulació 2: Impacte sobre els obstacles

6.- El gruix mig de neu en la zona de dipòsit ha estat del 80% del gruix original, 40cm, 10cm més que en l'anterior simulació. Això és degut a que l'allau ha desaccelerat d'una manera més ràpida que en l'altra prova.

7.1.8. Simulació 3

Descripció:

Per la tercera prova hem afegit un sol obstacle sobre l'escenari inicial. Aquest obstacle, però, és una refugi de grans dimensions que oferirà una resistència molt alta a l'allau quan aquesta passi per la cel·la que el conté.

Desencadenant:

Localització: 1 cel·la (112, 33)

Gruix de neu de placa: 50cm

Terreny subjacent: Neu dura

Obstacles: 1 refugi de grans dimensions en el camí de l'allau.

Característiques de l'allau:

Terreny subjacent del camí: Neu dura

Màxima distància recorreguda: **570,09m**

Desnivell superat: **376,00m**

Desnivell màxim: 139%

Desnivell mig: **84%**

Desnivell mig tram superior: 108%

Desnivell mig tram inferior: **34%**

Massa transportada: 625kg

Massa de neu en dipòsit: **351,25kg**

Massa de neu perduda pel camí: **273,75kg**

Velocitat màxima: 20,95m/s

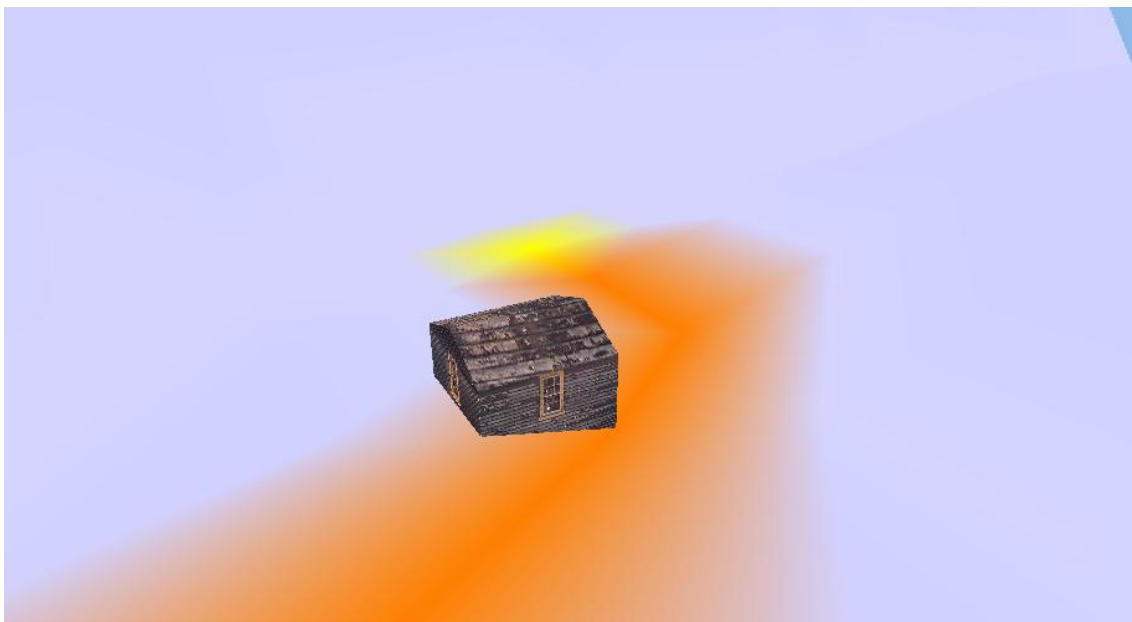


Figura 7.8 – Simulació 3: Visualització.

Taula d'iteracions i gràfiques:

| pas | X | Y | Distància | Alçada | Desn. | % D. | F | Vel. | Acc. | Gruix |
|-----|-----|----|-----------|--------|-------|------|---------|-------|--------|-------|
| 0 | 112 | 33 | 0 | 2811,5 | 0 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,5 |
| 1 | 113 | 34 | 61 | 2764,4 | 47,1 | 94% | 1760,6 | 2,82 | 2,82 | 0,5 |
| 2 | 114 | 35 | 122 | 2713,2 | 51,2 | 102% | 3783,9 | 6,33 | 3,52 | 0,478 |
| 3 | 115 | 36 | 182 | 2643,7 | 69,5 | 139% | 6589,7 | 11,19 | 4,86 | 0,471 |
| 4 | 116 | 37 | 243 | 2575,0 | 68,7 | 137% | 9323,9 | 15,90 | 4,71 | 0,469 |
| 5 | 117 | 38 | 304 | 2533,5 | 41,5 | 83% | 10599,3 | 18,12 | 2,21 | 0,468 |
| 6 | 118 | 39 | 365 | 2486,3 | 47,2 | 94% | 12253,5 | 20,95 | 2,83 | 0,468 |
| 7 | 119 | 40 | 426 | 2457,0 | 29,3 | 59% | 2984,6 | 5,45 | -15,49 | 0,438 |
| 8 | 119 | 41 | 487 | 2448,6 | 8,4 | 17% | 1183,5 | 2,52 | -2,93 | 0,376 |
| 9 | 119 | 42 | 547 | 2434,9 | 13,7 | 27% | 118,7 | 0,34 | -2,18 | 0,281 |
| 10 | 119 | 43 | 547 | 2434,9 | 0 | 0% | 0,0 | 0,00 | -0,34 | 0,281 |

La cel·la assenyalada conté l'obstacle

Taula 7.5 – Simulació 3: Taula d'iteracions

1.- L'obstacle aconsegueix reduir pràcticament quasi tota la força de desplaçament de l'allau al pas per la cel·la que el conté. (Figura 7.9).

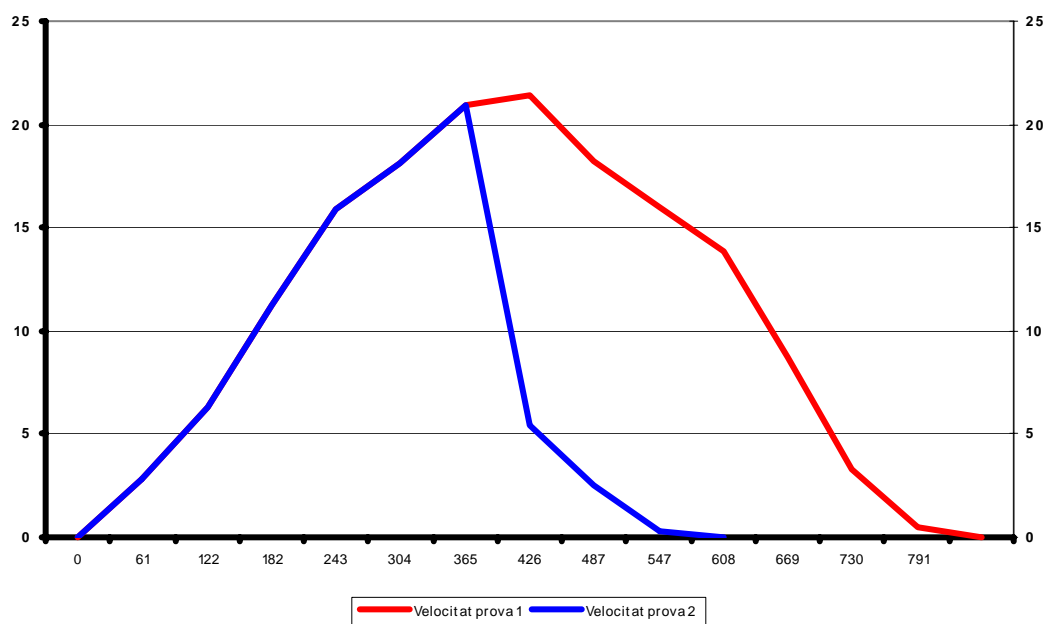


Figura 7.9 – Velocitat Sim.1 VS Velocitat Sim.3

2.- Passat l'obstacle, l'allau desaccelerada més suaument que en les anteriors ocasions donat que s'ha quedat amb molt poca força de desplaçament en un pendent intermig i aconsegueix sobreviure 2 cel·les més enllà de l'obstacle.

3.- La pèrdua de massa en les últimes 3 cel·les és notable degut a la baixa velocitat en que es manté l'allau.

7.1.9. Simulació 4

Descripció:

En aquest cas augmentem el gruix de la placa al doble per comprovar els efectes del pes de l'allau.

Desencadenant:

Localització: 1 cel·la (112, 33)

Gruix de neu de placa: 100cm

Terreny subjacent: Neu dura

Obstacles: No

Característiques de l'allau:

Terreny subjacent del camí: Neu dura

Màxima distància recorreguda: **710,63m**

Desnivell superat: **383,60m**

Desnivell màxim: 139%

Desnivell mig: **64%**

Desnivell mig tram superior: 108%

Desnivell mig tram inferior: 17%

Massa transportada: **1250kg**

Massa de neu en dipòsit: **1196,25kg**

Massa de neu perduda pel camí: **53,75kg**

Velocitat màxima: **20,95m/s**

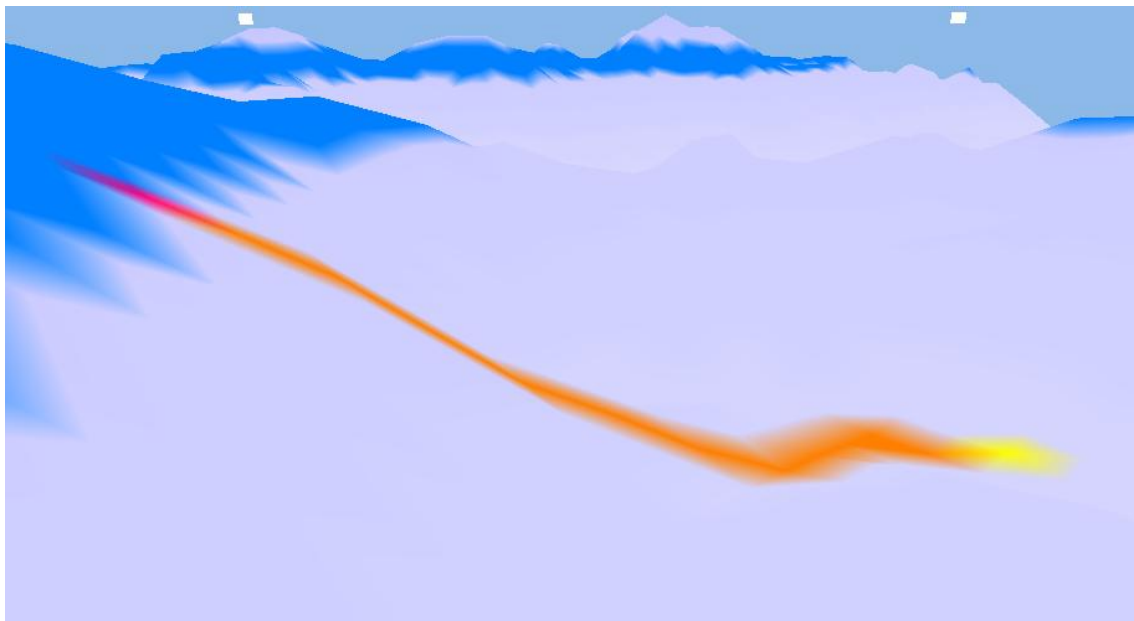


Figura 7.10 – Simulació 4: Visualització.

Taula d'iteracions i gràfiques:

| pas | X | Y | Distància | Alçada | Desnivell | % D | F | Velocitat | Acceleració | Gruix |
|-----|-----|----|-----------|--------|-----------|------|---------|-----------|-------------|-------|
| 0 | 112 | 33 | 0 | 2811,5 | | | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 113 | 34 | 61 | 2764,4 | 47,1 | 94% | 3588,0 | 2,87 | 2,87 | 1 |
| 2 | 114 | 35 | 122 | 2713,2 | 51,2 | 102% | 7634,6 | 6,13 | 3,26 | 0,996 |
| 3 | 115 | 36 | 182 | 2643,7 | 69,5 | 139% | 13480,9 | 10,83 | 4,70 | 0,996 |
| 4 | 116 | 37 | 243 | 2575,0 | 68,7 | 137% | 19262,7 | 15,47 | 4,64 | 0,996 |
| 5 | 117 | 38 | 304 | 2533,5 | 41,5 | 83% | 21971,3 | 17,65 | 2,18 | 0,996 |
| 6 | 118 | 39 | 365 | 2486,3 | 47,2 | 94% | 25491,8 | 20,48 | 2,83 | 0,996 |
| 7 | 119 | 40 | 426 | 2457,0 | 29,3 | 59% | 26088,7 | 20,95 | 0,48 | 0,996 |
| 8 | 119 | 41 | 487 | 2448,6 | 8,4 | 17% | 21992,8 | 17,66 | -3,29 | 0,996 |
| 9 | 119 | 42 | 547 | 2434,9 | 13,7 | 27% | 19172,3 | 15,40 | -2,27 | 0,996 |
| 10 | 119 | 43 | 608 | 2421,2 | 13,7 | 27% | 16351,6 | 13,13 | -2,27 | 0,996 |
| 11 | 120 | 43 | 669 | 2423,6 | -2,4 | -5% | 9673,1 | 7,79 | -5,35 | 0,994 |
| 12 | 121 | 44 | 730 | 2428,3 | -4,7 | -9% | 2449,1 | 2,05 | -5,74 | 0,957 |
| 13 | 121 | 44 | 730 | 2428,3 | 0 | 0% | 0 | 0,00 | -2,05 | 0,957 |

Taula 7.6 – Simulació 4: Taula d'iteracions

1.- La força de desplaçament de l'allau és pràcticament el doble quan aquesta conté el doble de gruix (Figura 7.11).

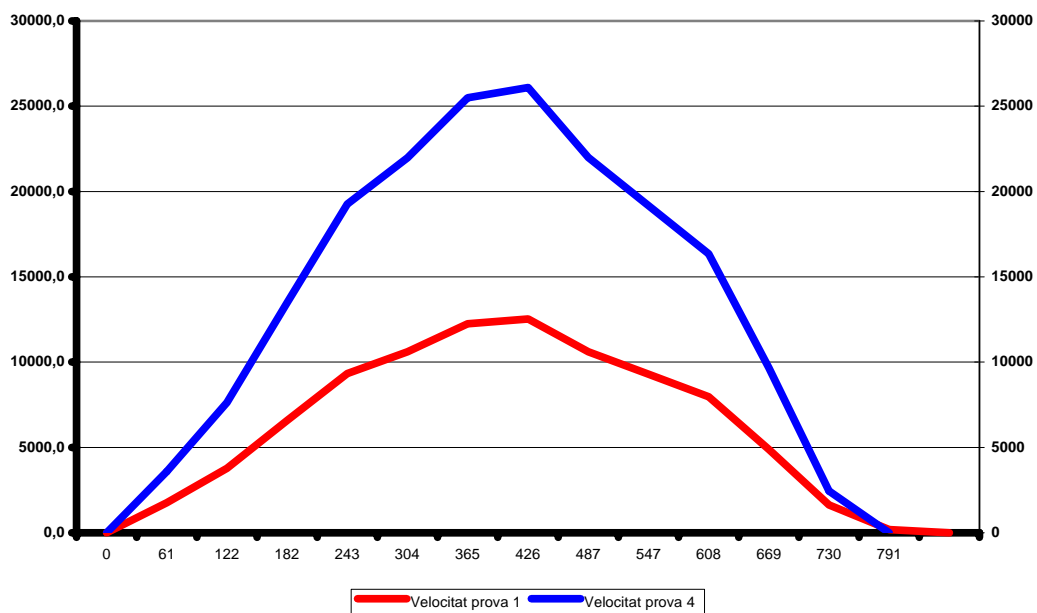


figura 7.11 – Simulació 4: Desnivell VS Acceleració

2.- Tot i que l'allau conté més massa, l'acceleració, en les mateixes condicions que en la primera prova, és similar, això és degut a l'acció de la força de resistència per fregament (Figura 7.12).

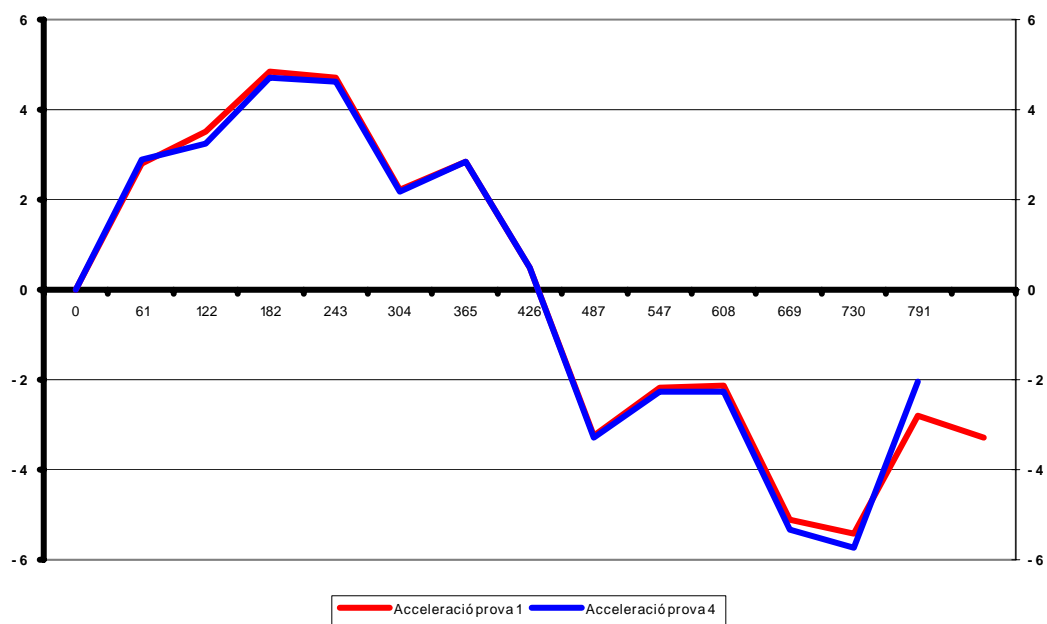


Figura 7.12 – Acceleració Sim.1 VS Acceleració Sim.4

3.- Al final de l'allau la desacceleració és major i això ocasiona que l'allau s'aturi 1 cel·la abans (61m) del que ho feia en la primera simulació.

4.- La pèrdua de gruix de neu durant el trajecte és menor a la de la primera prova tot i que l'allau compta inicialment amb el doble de massa, això es degut a que la força de desplaçament és molt major i a que la desacceleració és més ràpida.

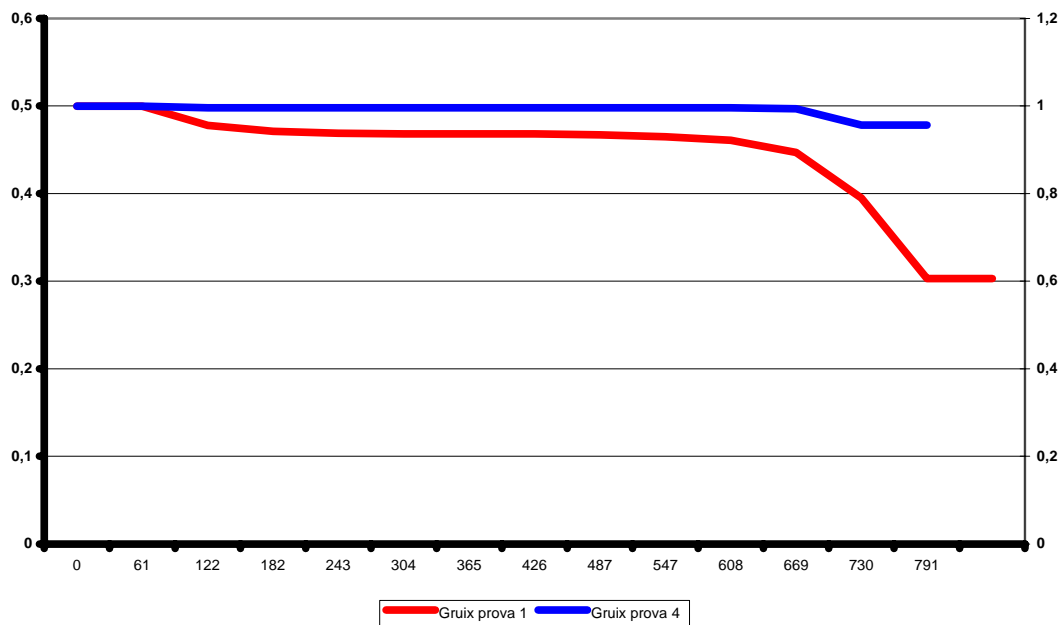


Figura 7.13 – Gruix Sim.1 VS Gruix Sim.4

7.1.10. Simulació 5

Descripció:

Demostrat el funcionament del model per allaus d'una sola cel·la, comprovem com funciona en allaus que involucrin més d'una cel·la. En aquest cas, hem provat de desencadenar una allau de grans dimensions a partir d'una fractura horitzontal de 400 metres.

Desencadenant:

Localització: 8 cel·les, de (108, 33) fins (115, 33)

Gruix de neu de placa: 50cm (per totes les cel·les fracturades)

Terreny subjacent: Neu dura

Obstacles: No

Característiques de l'allau:

Terreny subjacent del camí: Neu dura

Màxima distància recorreguda: 1101,14m

Desnivell superat: 520,40m

Massa transportada: 10625kg

Massa de neu en dipòsit: 9957,50kg

Massa de neu perduda pel camí: 667,5kg

Velocitat màxima: 67,23m/s

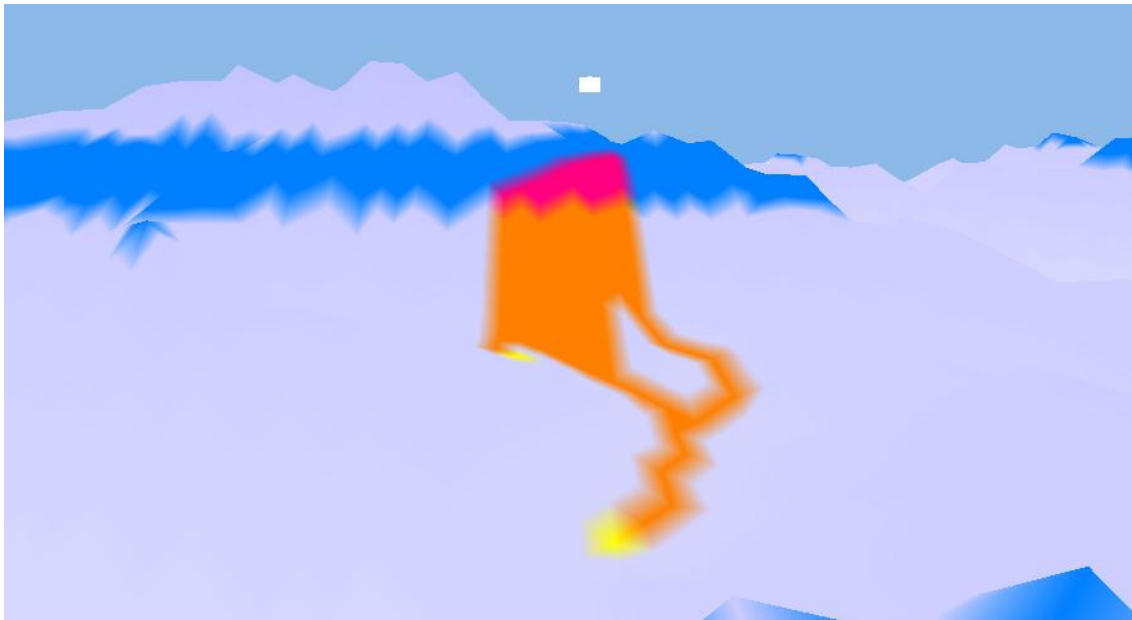


Figura 7.14 – Simulació 5: Visualització.

Descripció dels resultats:

- 1.- Al produir-se la fractura, les cel·les de major alçada amb contingut de neu de placa propaguen el trencament a les inferiors (Figura 7.13). D'aquesta manera les 8 cel·les de trencament inicials involucren a 9 cel·les més en l'allau, demostrant el correcte funcionament de la fase de propagació del model.
- 2.- Cadascuna de les 17 cel·les conté 50 cm de gruix de neu mobilitzable, contant que una cel·la té una àrea de 2.500m^2 i la neu de placa té una densitat $0,5\text{kg/m}^3$, el total de la massa de neu que entra en lliscament és de 10.625kg .
- 3.- Com podem veure en la següent figura, en el lliscament l'allau es divideix en tres fronts: l'esquerra, el qual s'atura ràpidament, el central, que transporta almenys el 75% de la massa, i el dret, el qual salva un petit turó i s'uneix al camí del front principal.
- 4.- En total l'allau forma 2 zones de dipòsit: el dipòsit del front esquerre amb un petit gruix de 42cm de mitja i el dipòsit del front principal amb un gruix mig de 7 metres.



Figura 7.15 – Simulació 5: Visualització (2)

7.1.11. Comparació dels resultats amb dades reals

Comparem, tot seguit, alguns dels resultats més rellevants de les proves de simulació amb les dades reals que hem mostrat a principi de capítol. D'aquesta manera veurem si el comportament de les allaus simulades s'ha ajustat suficientment al dels fenòmens del món real.

L'acceleració de les allaus es produeix, normalment, en pendents superiors al 58% [8]. En diferents proves realitzades hem pogut detectar que en pendents del 59% d'inclinació l'acceleració era aproximadament de $0,5\text{m/s}^2$ per camins sense presència d'obstacles (proves 1 i 4).

L'acceleració en un pendent del 27% d'inclinació, ha estat, en condicions normals, de -2m/s^2 aproximadament. Segons [8] la desacceleració comença a ser notòria a partir del 37% cap a baix. Sembla doncs, que els resultats de les nostres proves s'aproximen força a aquests valors.

Per una altra banda, la velocitat màxima aconseguida per l'allau en les 4 primeres simulacions ha estat d'aproximadament 21m/s , valor que la definiria com allau de mitjanes dimensions, tendint cap a petites, segons la taula de velocitats típiques. En quant a la cinquena prova, que ja havíem definit d'entrada com a simulació d'una allau de grans dimensions, aquesta ha aconseguit una velocitat d'aproximadament 67m/s , valor que quedaria una mica per sobre de les velocitats típiques d'allaus de grans dimensions [8].

En quant a les distàncies recorregudes, tan verticalment com horitzontalment, les marques aconseguides per les nostres allaus han estat sensiblement inferiors a les que reflectien les dades de l'allau real descrit anteriorment. Cal tenir en compte però, que el desnivell mig del vessant que hem emprat per a realitzar les proves era d'un 61% d'inclinació (en condicions normals) i, en canvi, en el cas real era del 86%.

Vistes les semblances de les estadístiques principals del fenomen, entre els resultats aconseguits en les proves i les dades recollides d'esdeveniments reals, podem dir que el model es pot aproximar a la realitat. Òbviament, s'hauria de realitzar una major quantitat de proves, simular allaus reals dels que tinguéssim suficient informació, realitzar treball de camp, etc, per tal d'ajustar i validar el model de simulació desenvolupat.

7.2. Proves de rendiment

A continuació mostrem les taules de mesura del rendiment de l'aplicació. Primerament veurem les taules referides al temps d'execució de cada funcionalitat i després les referides al temps necessari per a la representació en 3D segons funcionalitat. El temps sempre és expressat en segons.

La màquina de proves constava d'un processador P-IV 3Ghz i d'1Gb de memòria RAM. Cada prova s'ha executat 3 vegades i s'ha calculat la mitja del temps.

Generació de l'escenari

Per a la primera funcionalitat disponible per l'usuari, el temps d'execució dependrà de la quantitat de cel·les del grid que emmagatzemen la informació SIG del relleu (3 capes).

Segons els resultats obtinguts, el rendiment de la funcionalitat és prou bo fins a grids de 45.000 cel·les, a partir d'aquest número el temps creix de forma pràcticament exponencial.

Tot i això, mitjançant un grid de 45.000 cel·les (300x300), en tenim suficient per representar, per exemple, una àrea de 56,25km² amb cel·les de 625m² o una àrea de 9km² amb cel·les de 100m²

| Generació escenari | |
|--------------------|--------|
| Nº cel·les | Temps |
| 22.500 | 1,27s |
| 45.000 | 3,74s |
| 90.000 | 13,68s |

Taula 7.7 – Proves de rendiment per 'Generació d'escenari'

Importació d'obstacles

La funcionalitat que permet a l'usuari incorporar obstacles sobre el relleu depèn, principalment, del nombre d'obstacles total que indiquin els fitxers SIG i, en menor mida, del nombre de capes que s'hagin de tractar.

El temps aconseguits han estat força bons, podent emmagatzemar, per exemple, uns 10.000 obstacles en aproximadament 8 segons i mig per un grid de 25.000 cel·les (40%). Per a grids majors el temps seria lleugerament superior.

| Importació d'obstacles | | | |
|------------------------|----------------|--------------|-------|
| Nº capes | obstacles/capa | Nº obstacles | Temps |
| 1 | 100 | 100 | 0,89s |
| 2 | 100 | 200 | 1,48s |
| 3 | 100 | 300 | 1,80s |
| 1 | 1.000 | 1.000 | 1,82s |
| 1 | 5.000 | 5.000 | 4,88s |
| 1 | 10.000 | 10.000 | 8,46s |
| 2 | 5.000 | 10.000 | 9,11s |

Taula 7.8 – Proves de rendiment per 'Importació d'obstacles'

Definició del desencadenament

En quant al temps d'afegir la línia de fractura a l'escenari, aquest ha estat sempre inferior a 1 segon per grids de 25.000 cel·les i lleugerament major per grids de 45.000 cel·les. L'augment de temps segons la grandària de la línia ha resultat imperceptible al realitzar les proves.

| Definició fractura | |
|--------------------|-------|
| Nº cel·les | Temps |
| 22.500 | 0,84s |
| 45.000 | 1,51s |

Taula 7.9 – Proves de rendiment per 'Definició de fractura'

Simulació

Pel que fa al temps d'execució de la simulació, els resultats han estat realment bons, tant pels temps aconseguits com pel fet de que l'augment de temps és mínim com majors siguin el nombre d'iteracions i el nombre de cel·les involucrades en l'allau, garantint bons resultats, d'aquesta manera, en escenaris amb major detall.

| Simulació | | |
|---------------|---------|-------|
| Nº iteracions | Cel·les | Temps |
| 14 | 1 | 1,05s |
| 16 | 3 | 1,03s |
| 16 | 11 | 1,12s |
| 16 | 17 | 1,18s |
| 16 | 36 | 1,11s |
| 38 | 24 | 1,33s |
| 42 | 45 | 1,38s |

Taula 7.10 – Proves de rendiment per 'Simulació'

En la taula, la primera columna expressa el nombre de passos de simulació en la fase de lliscament, mentre que la segona indica el nombre màxim de cel·les que realitzen un desplaçament en un dels passos.

Representació de l'escenari segons la grandària del grid

Tal com succeïa en l'implementació de la funcionalitat de *Generació de l'escenari*, el temps de procés per a que la representació gràfica sigui disponible per a l'usuari és prou bo per a grids de 45.000 cel·les, i fins i tot de 90.000. Malgrat això, la funció del temps respecte el nombre de cel·les té un creixement pràcticament exponencial, fet que pot provocar llargs temps de espera per escenaris de grans dimensions i detall.

| Representació escenari | |
|------------------------|-------|
| Nº cel·les | Temps |
| 22.500 | 0,76s |
| 45.000 | 1,94s |
| 90.000 | 9,40s |

Taula 7.11 – Proves de rendiment per 'Representació 3D de l'escenari'

Representació de l'escenari segons el nombre d'obstacles

El temps de procés per a la representació 3D de l'escenari amb obstacles dependrà, en gran mida, del volum d'objectes incorporats al sistema i en la complexitat de la seva representació.

Hem realitzat proves emprant tres prototips (representació de l'objecte). El primer (mur de contenció), comptava amb una estructura i textures bastant simples (el seu pes total en disc era d'11Kb); el segon (arbre gran), tenia una estructura força complexa i no comptava amb cap textura (57Kb); per últim, el tercer obstacle (casa-refugi), tenia una estructura molt simple però en canvi comptava amb textures molt ben detallades (357Kb).

En la següent taula podem veure els resultats. A partir d'aquests podem dir que la representació del segon tipus d'obstacle (arbres grans) no és l'adequada donat a que és un tipus d'obstacle que pot tenir una aparició força freqüent en una simulació d'aquest tipus i el seu cost de representació és excessiu. Pel que fa al tercer obstacle (refugi), reduint el detall de les seves textures podríem aconseguir molt millors resultats.

| Representació escenari + obstacles | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|-----------|--------|
| Nº capes | obstacles/capa | Pes objecte 1 | Pes objecte 2 | Pes objecte 3 | Pes total | Temps |
| 1 | 100 | 11Kb | | | 1.100 | 1,10s |
| 1 | 100 | 57Kb | | | 5.700 | 2,35s |
| 2 | 100 | 11Kb | 57Kb | | 6.800 | 5,41s |
| 1 | 1.000 | 11Kb | | | 11.000 | 3,82s |
| 1 | 100 | 357Kb | | | 35.700 | 25,69s |
| 3 | 100 | 11Kb | 57Kb | 357Kb | 42.500 | 24,64s |
| 1 | 5.000 | 11Kb | | | 55.000 | 15,44s |
| 1 | 1.000 | 57Kb | | | 57.000 | 23,35s |
| 2 | 5.000 | 11Kb | 11Kb | | 110.000 | 31,77s |
| 1 | 1.000 | 357Kb | | | 357.000 | - |

Taula 7.12 – Proves de rendiment per 'Representació 3D amb obstacles'

8. PLANIFICACIÓ

8.1. Planificació i dedicació

8.1.1. Planificació inicial

Una vegada transmesa la idea original del projecte per part del director, en Pau Fonseca, la planificació inicial que es va estimar per aquest projecte fou la següent:

- a) Investigació i documentació sobre moviments de vessant, allaus i Sistemes d'Informació Geològica. **50h**
- b) Investigació i documentació sobre l'ús d'autòmats cel·lulars en el camp de la simulació. **50h**

Finalitzat el treball de recerca, s'havia d'escollir un tipus d'allau en concret per a ser modelat i a partir d'aquest construir la infraestructura d'un simulador d'allaus i afegir-ne una implementació inicial d'aquest tipus de fenomen.

Donada la major quantitat de dades de que es disposava dels anomenats allaus de placa respecte els altres tipus i per motivació personal es va decidir modelar aquest tipus de fenomen.

- c) Modelatge d'un tipus d'allau en concret mitjançant l'ús d'un autòmat cel·lular. **60h**

Finalitzada l'etapa de modelatge s'havia d'iniciar la construcció de l'aplicació del simulador d'allaus. L'objectiu, dins d'aquest projecte, era la d'assentar les bases per a poder simular tot tipus d'allau i implementar-ne el tipus modelat.

Les etapes de la construcció de l'aplicació són les habituals de l'enginyeria del software:

- d) Anàlisi (anàlisi de requeriments, elecció de plataforma, llenguatge de programació, arquitectura, interfície d'usuari i representació gràfica). **40h**
- e) Especificació (arquitectura del sistema, model de casos d'ús, model de comportament i model conceptual). **60h**

- f) Disseny i implementació (estructures de dades, procediment d'importació de dades al sistema, implementació de l'autòmat cel·lular, motor de la simulació, etc). **180h**
- g) Experimentació (validació del funcionament i proves de rendiment de l'aplicació). **60h**
- h) Elaboració de la documentació del projecte i del manual de l'usuari. **100h**

El total d'hores ascendia a 600, el que equival a un projecte de 30 crèdits lectius de l'Enginyeria Informàtica.

8.1.2. Dedicació final

A efectes pràctics, la planificació inicialment establerta no s'ha arribat a complir al 100%, tal com succeeix en masses ocasions en els projectes d'enginyeria, ja que s'ha hagut d'ampliar en prop de 125 hores per a la finalització del projecte. Això ha estat degut, principalment, a dos motius: primer, pel fet d'establir uns criteris de planificació sobre unes tecnologies que inicialment es desconeixien, malgrat haver deixat un marge per als possibles imprevistos, i, segon, degut a que la comprensió del codi a reutilitzar ha resultat més difícil del que era d'esperar. Tot i això, podem mostrar satisfacció per haver complert els objectius del projecte.

La dedicació final ha quedat de la següent manera, respecte de la planificació inicial:

| Eta | T. estimat | increment | T. real |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|----------------|
| Investigació | 100 | +12 | 112 |
| <i>Mov. Vessants, allaus i SIGs</i> | | | 54 |
| <i>Autòmats cel·lulars</i> | | | 58 |
| Modelatge | 60 | +14 | 74 |
| Anàlisi | 40 | | 40 |
| Especificació | 60 | +12 | 72 |
| Disseny i Implementació | 180 | +88 | 262 |
| <i>Estructures de dades</i> | | | 32 |
| <i>Importació de dades</i> | | | 64 |
| <i>Motor de simulació</i> | | | 60 |
| <i>Interfície d'usuari</i> | | | 20 |
| <i>Ús de la RV</i> | | | 52 |
| <i>Altres</i> | | | 34 |
| Experimentació | 60 | +4 | 64 |

| | | | |
|-----------------------------------|------------|-------------|------------|
| <i>Validació del funcionament</i> | | | 56 |
| <i>Rendiment</i> | | | 8 |
| Elaboració de la memòria | 100 | | 100 |
| TOTAL | 600 | +124 | 724 |

Taula 8.1 – Planificació i dedicació final.

8.2. Anàlisi del cost

8.2.1. Rols

Per la realització d'aquest projecte es considera a dues persones que compleixen un rol cadascuna.

- **Director:** és la persona responsable del projecte. La seva tasca és la de precisar els objectius del projecte amb l'analista-programador a l'inici, supervisar la feina realitzada en les etapes intermèdies mitjançant reunions periòdiques, i, a les acaballes, revisar i corregir la memòria i difondre el projecte. El seu propòsit no és el de dirigir a l'analista-programador, sinó de proporcionar-li els recursos que consideri adequats perquè aquest pugui materialitzar el projecte i guiar-li en aquells punts on l'enginyer dubta en el seu procediment. Té un preu de cost de 50 €/hora i ha de tenir un perfil d'enginyer informàtic amb experiència en la gestió de projectes.
- **Analista-programador:** és la persona encarregada de materialitzar el projecte i prendre les decisions d'especificació, disseny i implementació. Els perfils d'enginyeria informàtica més adequats per a aquest projecte són: Investigació operativa, Enginyeria del software i sistemes d'informació i Gestió i explotació de la informació. El seu preu és de 30 €/hora.

8.2.2. Cost en recursos humans

Les següents taules mostren el cost de cada rol del projecte segons la dedicació final de cadascun. Pel cas de l'analista s'han comptabilitzat les hores dedicades per cada etapa del projecte, mentre que pel director s'han comptabilitzat segons les tasques que ha desenvolupat a llarg termini. Cal aclarir que les hores dedicades per l'analista-programador en les reunions periòdiques amb el director ja són incloses en les respectives etapes del projecte.

| ANALISTA-PROGRAMADOR | | | |
|--------------------------|--------------|-------------|-----------------|
| Etapa | temps | preu | cost |
| Investigació | 112 | 30 | 3.360 € |
| Modelatge | 74 | " | 2.220 € |
| Anàlisi | 40 | " | 1.200 € |
| Especificació | 72 | " | 2.160 € |
| Disseny i Implementació | 268 | " | 8.040 € |
| Experimentació | 64 | " | 1.920 € |
| Elaboració de la memòria | 100 | " | 3.000 € |
| TOTAL | 724 | | 21.900 € |

Taula 8.2 – Cost en recursos humans – Analista-Programador

| DIRECTOR | | | |
|-----------------------------------|--------------|-------------|----------------|
| Tasca | temps | preu | cost |
| Inici projecte | 10 | 50 | 500 € |
| Assessorament | 20 | " | 1.000 € |
| Supervisió del treball realitzat | 15 | " | 750 € |
| Revisió i correcció de la memòria | 15 | " | 750 € |
| TOTAL | 60 | | 3.000 € |

Taula 8.3 – Cost en recursos humans – Director

8.2.3. Cost de material i serveis

En quant al cost material, aquest ha estat de zero ja que es disposava de lloc de treball equipat amb 1 PC amb processador Pentium-IV 3,0Ghz, amb 1GB de memòria RAM, amb el sistema operatiu Windows XP-SP2 i amb el software necessari instal·lat sota llicència.

El cost en serveis queda expressat en la següent taula:

| Servei | cost |
|-----------------------------|--------------|
| Consum elèctric | 20 € |
| Servei de connexió ADSL 6MB | 390 € |
| Documentació | 100 € |
| Varis | 50 € |
| TOTAL | 560 € |

Taula 8.4 – Cost de serveis

8.2.4. Cost final

El cost total del projecte ascendeix a 24.900 euros en recursos humans més 560 euros en el consum de serveis. En total **25.460€**.

8.2.5. Implantació

El cost d'implantació del software és de zero si es disposa d'una màquina amb els següents requisits mínims:

- Processador Pentium-IV (o equivalent)
- 256MB RAM
- SO Windows 2000/XP
- Instal·lació del browser d'VRML Cosmo Player 2.1

9. CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR

9.1. Conclusions

Finalitzat el projecte i en vista a les motivacions inicials, ens podem mostrar satisfets ja que hem pogut establir una base per al possible futur desenvolupament d'un simulador d'allaus. Globalment, dir que s'han acomplert tots els objectius marcats inicialment, malgrat que s'han hagut d'augmentar les hores de treball planificades inicialment, tal com hem explicat en el capítol anterior.

9.1.1. Sobre el model de simulació

Pel que fa al model de simulació d'allaus de placa desenvolupat, encara que la seva validació amb la realitat no formava part d'aquest projecte, hem comprovat que els resultats de la simulació s'aproximen als valors tipus del fenomen.

Esmentar que en el seu desenvolupament, es va ser rigorós en el càlcul de les dues forces principals que intervenen en el fenomen de les allaus de placa i de qualsevol altre tipus: la força impulsora i la força de resistència per fregament de la massa gelada, aplicant estrictament la teoria de la física de lliscament dels cossos (amb una omissió, però, que comentarem en el capítol de treball futur). Per contra, això no va ser així pel càlcul de les forces de resistència interna i per impacte i les pèrdues de massa, les quals es van anar ajustant a través de l'experimentació amb el simulador, requerint, d'aquesta manera, un major estudi com a possible ampliació del model.

En quant a l'estructura emprada, l'ús d'un autòmat cel·lular podem dir que ha estat totalment adequat per al modelatge d'un fenomen com el que ens ha dedicat en aquest projecte, gracies a la simplicitat amb la que s'ha pogut representar un sistema global dinàmic com aquest.

9.1.2. Sobre el simulador

En quant a l'aplicació desenvolupada, s'han aconseguit implementar totes les funcionalitats previstes i, a més a més, el rendiment en execució assolit també ha resultat ser força satisfactori, sobretot pel que fa al procés de simulació en si, que s'ha basat en la simplicitat dels models microscòpics, garantint d'aquesta manera bons resultats també per simulacions amb major nivell de detall.

Pel que fa a la representació de l'escenari, l'ús de la tecnologia VRML permet generar escenaris reals relativament grans, oferint un bon rendiment. A més a més, l'usuari assoleix una gran llibertat de moviments podent visualitzar el fenomen simulat des de qualsevol angle. Un dels problemes que sorgeix, però, en la representació d'un allau, és el que ocasiona la enorme diferència entre l'alçada del relleu i el gruix de la massa gelada, que, tot i que pot ser relativament gran, és insignificant en comparació a la magnitud de les elevacions del relleu resultant pràcticament imperceptible en la visualització. Aquest fet s'ha aconseguit solucionar, com hem vist, mitjançant una adequada coloració de l'àrea recorreguda per l'allau.

Per una altra banda cal esmentar, que per ara l'aplicació consta de dos punts febles: primerament, el sistema poc pràctic per a l'usuari d'establir el desencadenament de l'allau en una localització en concret ja que el motor gràfic no disposa de cap element d'interacció directa amb el relleu de l'escenari, i, per una altra banda, el temps de procés per a la generació d'escenaris que incorporen obstacles. Per aquesta última qüestió, en la continuació del projecte seria convenient que el grafista combinés simplicitat amb realisme en el disseny gràfic de tot objecte que es pogués importar al sistema.

Tanmateix, globalment existeix la dificultat d'obtenir dades SIG actualitzades, validades i de forma ràpida. En un treball futur cal analitzar aquest problema i establir els mecanismes per solucionar-lo donada l'importància d'aquest fet en l'implantació del simulador.

9.2. Vies de continuïtat

L'objectiu principal d'aquest projecte era el de construir la base per al desenvolupament d'un simulador d'allaus complet. Tanmateix, una de les característiques principals d'aquest projecte de simulació havia de ser la modularitat (o canviabilitat), per tal de que tota ampliació i millora es pogués adaptar fàcilment. Aconseguits els objectius, expliquem, tot seguit, quines podrien ser les principals ampliacions i millores del projecte arribat a aquest punt.

9.2.1. Respecte al model d'allaus de placa

- Actualment, durant la fase de lliscament de l'allau, pel càlcul de la força de resistència de fregament amb la superfície només es considera un sol coeficient de fregament per a cada tipus de terreny subjacent. En la teoria física del lliscament, en realitat se'n consideren dos tipus: el coeficient estàtic, que s'empra quan el cos

ha d'iniciar el moviment, i el coeficient dinàmic, que es refereix a quan el cos ja està en moviment. En el projecte actual no es va realitzar aquesta diferenciació amb l'objectiu de simplificar les regles de lliscament. Es va calcular un únic coeficient mitjançant la mitja ponderada dels dos coeficients reals. Donats els bons resultats de rendiment en el procés de simulació aquesta podria ser una de les primeres ampliacions al model.

- Caldria analitzar-se els càlculs de les forces de resistència interna i per impacte amb obstacles i de les pèrdues de massa donat que aquests s'han extret per mètodes no validats científicament.

9.2.2. Respecte al modelatge d'altres tipus d'allau

Per a modelar i implementar altres tipus de neu cal fer les següents consideracions.

- En altres tipus d'allau, la rellevància de les forces de resistència varia o n'apareixen de noves (fricció amb líquids, amb l'aire, entre d'altres).
- Tenir en compte que en alguns tipus d'allau, com les allaus de neu pols, la massa pot avançar expandint-se verticalment respecte del sentit del moviment. Per tant, pel que fa a l'autòmat cel·lular pot existir la possibilitat que una cel·la *desplaci* el bloc de neu en moviment cap a diversos destins. En aquest cas, caldria calcular el percentatge de la massa de la cel·la que es mou cap a cadascun dels destins. Estructuralment, això ja ha quedat preparat en aquest projecte.
- Alguns tipus d'allau *perden* massa degut a la suspensió d'aquesta en l'aire. D'aquesta manera s'hauria de comptar amb un nou algorisme que calculés aquest fet.
- Pel que fa al simulador, caldria indicar a quin tipus de neu fa referència la capa de *gruix* (neu recent, neu pols, etc) introduïda. Segons aquest paràmetre s'escollirien les regles de cada model per a la simulació.

9.2.3. Respecte a les funcionalitats del simulador

- Ampliar els tipus de terreny disponibles en el sistema i poder afegir vies de comunicacions com carreteres, camins o vies de ferrocarril.
- Ampliar els tipus d'obstacle disponibles en el sistema. De fet, es podria donar la possibilitat a l'usuari d'afegir obstacles personalitzats. Aquesta tasca es podria realitzar mitjançant l'implementació d'un *Editor*, que facilités la tasca a l'usuari i

emmagatzemés tant les característiques com la representació 3D de l'objecte en disc.

- Donar la possibilitat a l'usuari d'afegir obstacles sobre l'escenari quan el sistema ja està en marxa, sense haver de modificar els fitxers SIG. D'aquesta manera l'usuari podria experimentar amb l'efecte d'aquests fàcilment. Aquesta funcionalitat tindria importància en cas de que es volgués experimentar amb construccions de protecció anti-allau.
- Recol·lectar noves estadístiques, sempre que no empitjorin el rendiment del procés de simulació.
- Afegir a l'implementació la possibilitat de generar gràfiques estadístiques, tals com les que hem mostrat en el capítol d'experimentació (pendent, acceleració, velocitat, etc).

9.2.4. Respecte a la interfície gràfica

- Caldria afegir a l'interfície el mecanisme per a que l'usuari pogués introduir el desencadenament de l'allau interactuant directament sobre la representació 3D de l'escenari. Una altra possibilitat seria poder-ho realitzar sobre una representació 2D amb l'estructura del grid. Aquesta seria una important millora ja que actualment l'ús d'aquesta funcionalitat pot esdevenir molt complexa per l'usuari.
- De la mateixa manera que en el cas anterior, per consultar l'informació d'un parcel·la de l'escenari, poder-ho fer interactuant des de la pròpia representació 3D.
- *Animar* l'allau, es a dir, representar gràficament el fenomen des de l'estat inicial fins a l'estat final. Aquesta tasca no s'ha realitzat en aquest projecte donat que era costós d'implementar i, alhora, perquè la informació addicional que podia afegir aquest fet era relativament poca.
- Poder afegir una ortofoto sobre el relleu del món virtual. Una ortofoto és en una presentació fotogràfica que ha estat corregida digitalment per a representar una projecció ortogonal sense efectes de perspectiva d'un objecte generada a partir de fotografies reals obliqües. Aquesta millora només seria a nivell visual, podent produir una reducció el rendiment de l'interacció de l'usuari amb l'escenari.
- Configuració a mida de l'usuari:
 - o Multilinguatge.

- Possibilitat de regular la proporció de l'eix vertical (alçades), respecte dels altres eixos (actualment és sempre 1:1:2,5).
- Poder definir les paletes de color emprades en la representació.

10. ÍNDEXS I REFERÈNCIES

10.1. Índex de figures

| | |
|---|-----|
| FIGURA 2.1 – FORMACIÓ DE PLAQUES DE VENT | 25 |
| FIGURA 2.2 – FORÇA IMPULSORA I FORCES DE RESISTÈNCIA..... | 29 |
| FIGURA 2.3 – PENDENTS I FORCES | 30 |
| FIGURA 2.4 – ALLAU DE PLACA DURA | 32 |
| FIGURA 2.5 – ALLAU DE PLACA TOVA..... | 32 |
| FIGURA 2.6 – IMPACTE D'UN ALLAU DE NEU SECA O DE NEU POLS | 34 |
| FIGURA 2.7 – IMPACTE D'UN ALLAU DE NEU HUMIDA..... | 34 |
| FIGURA 2.8 – ESTRUCTURACIÓ D'INFORMACIÓ GEOGRÀFICA EN CAPES | 35 |
| FIGURA 2.9 – MODELITZACIÓ GEOGRÀFICA DE LA REALITAT | 36 |
| FIGURA 2.10 – MODALITATS DE LECTURA EN FITXERS RASTER | 37 |
| FIGURA 2.11 – VEÏNATGE DE VON NEUMANN..... | 45 |
| FIGURA 2.12 – VEÏNATGE DE MOORE | 45 |
| FIGURA 2.13 – DIAGRAMA ESPAI-TEMPS DE LA REGLA 90 R=1 | 46 |
| FIGURA 2.14 – EVOLUCIÓ DE L'AC "EL JOC DE LA VIDA" | 49 |
| FIGURA 2.15 – EVOLUCIÓ DE L'AC "MAJORIA ALINIADA" | 50 |
| FIGURA 3.1 – VEÏNATGE DE MOORE | 57 |
| FIGURA 3.2 – CANVIS DE TRAJECTÒRIA | 67 |
| FIGURA 3.3 – DIAGRAMA DE SISTEMA..... | 70 |
| FIGURA 3.4 – PORTS D'UNA CEL·LA | 74 |
| FIGURA 3.5 – BLOC MOTOR..... | 71 |
| FIGURA 3.6 – BLOC RELLOTGE..... | 71 |
| FIGURA 3.7 – BLOC ENTORN | 71 |
| FIGURA 3.8 – COMUNICACIÓ ENTRE CEL·LES | 74 |
| FIGURA 3.9 – DIAGRAMA D'ESTATS..... | 76 |
| FIGURA 3.10 – DIAGRAMA DE PROCÉS (ESTÀTIC) | 77 |
| FIGURA 3.11 – DIAGRAMA DE PROCÉS (BUI) | 78 |
| FIGURA 3.12 – DIAGRAMA DE PROCÉS (DINÀMIC) | 79 |
| FIGURA 4.1 – CICLE DE VIDA DEL PROJECTE | 86 |
| FIGURA 5.1 – DIAGRAMA DE CASOS D'ÚS | 95 |
| FIGURA 5.2 – ARQUITECTURA MVC..... | 101 |
| FIGURA 5.3 – DIAGRAMA DE SEQÜÈNCIA 1: GENERAR ESCENARI..... | 103 |
| FIGURA 5.4 – DIAGRAMA DE SEQÜÈNCIA 2: INSERIR OBSTACLES..... | 104 |
| FIGURA 5.5 – DIAGRAMA DE SEQÜÈNCIA 3: INSERIR FRACTURA | 105 |
| FIGURA 5.6 – DIAGRAMA DE SEQÜÈNCIA 4: FLUX DE LA SIMULACIÓ..... | 107 |
| FIGURA 5.7 – DIAGRAMA DE CLASSES 1: CONTROLADOR | 110 |
| FIGURA 5.8 – DIAGRAMA DE CLASSES 2: DADESGRID | 111 |
| FIGURA 5.9 – DIAGRAMA DE CLASSES 3: AMPLIACIÓ DE DADESGRID | 112 |
| FIGURA 5.10 – DIAGRAMA DE CLASSES 4: ALLAUSMOTOR..... | 113 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 5.11 – DIAGRAMA DE CLASSES 5: JERARQUIA DE GENERADORS..... | 114 |
| FIGURA 5.12 – DIAGRAMA DE CLASSES 6: INTERFÍCIE D'USUARI | 115 |
| FIGURA 6.1 – CURS NATURAL DE L'APLICACIÓ | 117 |
| FIGURA 6.2 – CEL·LES DE TRENCAMENT..... | 122 |
| FIGURA 6.3 – CANVIS DE TRAJECTÒRIA | 126 |
| FIGURA 6.4 – FINESTRA PRINCIPAL DE L'APLICACIÓ..... | 135 |
| FIGURA 6.5 – DIÀLEG 'CARREGAR ESCENARI' | 136 |
| FIGURA 6.6 – DIÀLEG 'CARREGAR OBSTACLES' | 137 |
| FIGURA 6.7 – DIÀLEG 'PUNTS DE TRENCAMENT' | 138 |
| FIGURA 6.8 – DIÀLEG 'INFORMACIÓ DE CEL·LA' | 138 |
| FIGURA 6.9 – DIÀLEG 'ESTADÍSTIQUES' | 139 |
| FIGURA 6.10 – VISTA INICIAL DEL MÓN VIRTUAL | 141 |
| FIGURA 6.11 – COLORACIÓ DE TERRENYS..... | 142 |
| FIGURA 6.12 – DETALL DELS OBSTACLES..... | 143 |
| FIGURA 6.13 – REPRESENTACIÓ DE LA FRACTURA INICIAL..... | 143 |
| FIGURA 6.14 – REPRESENTACIÓ DE L'ALLAU EN EL MÓN VIRTUAL..... | 144 |
| FIGURA 6.15 – GALERIA D'OBJECTES | 144 |
| FIGURA 7.1 – SIMULACIÓ 1: VISUALITZACIÓ..... | 148 |
| FIGURA 7.2 – SIMULACIÓ 1: DESNIVELL VS ACCELERACIÓ | 149 |
| FIGURA 7.3 – SIMULACIÓ 1: ALÇADA VS VELOCITAT | 150 |
| FIGURA 7.4 – SIMULACIÓ 1: FORÇA VS GRUIX..... | 150 |
| FIGURA 7.5 – SIMULACIÓ 2: VISUALITZACIÓ..... | 151 |
| FIGURA 7.6 – ACCELERACIÓ SIM.1 VS ACCELERACIÓ SIM.2 | 152 |
| FIGURA 7.7 – SIMULACIÓ 2: DESNIVELL VS ACCELERACIÓ | 153 |
| FIGURA 7.8 – SIMULACIÓ 3: VISUALITZACIÓ..... | 154 |
| FIGURA 7.9 – VELOCITAT SIM.1 VS VELOCITAT SIM.3 | 155 |
| FIGURA 7.10 – SIMULACIÓ 4: VISUALITZACIÓ..... | 156 |
| FIGURA 7.11 – SIMULACIÓ 4: DESNIVELL VS ACCELERACIÓ | 157 |
| FIGURA 7.12 – ACCELERACIÓ SIM.1 VS ACCELERACIÓ SIM.4 | 158 |
| FIGURA 7.13 – GRUIX SIM.1 VS GRUIX SIM.4..... | 158 |
| FIGURA 7.14 – SIMULACIÓ 5: VISUALITZACIÓ..... | 159 |
| FIGURA 7.15 – SIMULACIÓ 5: VISUALITZACIÓ (2)..... | 160 |

10.2. Índex de taules

| | |
|---|-----|
| TAULA 2.1 – ESCALA DE PERILLOSITAT DELS ALLAUS | 28 |
| TAULA 2.2 – VELOCITAT D'UN ALLAU SEGONS EL TIPUS DE NEU | 33 |
| TAULA 2.3 – MODEL RASTER VS MODEL VECTORIAL | 38 |
| TAULA 2.4 – VEÏNATGE $R=1$ D'UN AC BINARI I UN EXEMPLE DE REGLA D'EV | 45 |
| TAULA 2.5 – EVOLUCIÓ D'UNA LATTICE (FR. PERIÒDICA). REGLA 90 $R=1$ | 46 |
| TAULA 3.1 – COEFICIENTS DE FREGAMENT | 65 |
| TAULA 6.1 – DENSITAT DE LA NEU | 124 |
| TAULA 6.2 – COEFICIENTS DE FREGAMENT | 127 |
| TAULA 7.1 – VELOCITATS TIPUS D'UN ALLAU | 146 |
| TAULA 7.2 – SIMULACIÓ 1: TAULA D'ITERACIONS | 149 |
| TAULA 7.3 – SIMULACIÓ 2: TAULA D'ITERACIONS | 152 |
| TAULA 7.4 – SIMULACIÓ 2: IMPACTE SOBRE ELS OBSTACLES | 153 |
| TAULA 7.5 – SIMULACIÓ 3: TAULA D'ITERACIONS | 155 |
| TAULA 7.6 – SIMULACIÓ 4: TAULA D'ITERACIONS | 157 |
| TAULA 7.7 – PROVES DE RENDIMENT PER 'GENERACIÓ D'ESCENARI' | 162 |
| TAULA 7.8 – PROVES DE RENDIMENT PER 'IMPORTACIÓ D'OBSTACLES' | 163 |
| TAULA 7.9 – PROVES DE RENDIMENT PER 'DEFINICIÓ DE FRACTURA' | 163 |
| TAULA 7.10 – PROVES DE RENDIMENT PER 'SIMULACIÓ' | 163 |
| TAULA 7.11 – PROVES DE RENDIMENT PER 'REPRESENTACIÓ 3D DE L'ESCENARI' | 164 |
| TAULA 7.12 – PROVES DE RENDIMENT PER 'REPRESENTACIÓ 3D AMB OBSTACLES' ... | 165 |
| TAULA 8.1 – PLANIFICACIÓ I DEDICACIÓ FINAL | 169 |
| TAULA 8.2 – COST EN RECURSOS HUMANS – ANALISTA-PROGRAMADOR | 170 |
| TAULA 8.3 – COST EN RECURSOS HUMANS – DIRECTOR | 170 |
| TAULA 8.4 – COST DE SERVEIS | 170 |

10.3. Índex d'expressions

| | |
|---|-----|
| EXPRESSIÓ 2.1 – ACCELERACIÓ D'UN ALLAU | 31 |
| EXPRESSIÓ 2.2 – PRESSIÓ D'ALLAUS DE NEU SECA..... | 33 |
| EXPRESSIÓ 2.3 – PRESSIÓ D'ALLAUS DENSES | 33 |
| EXPRESSIÓ 2.4 – CODIFICACIÓ D'UNA REGLA | 45 |
| EXPRESSIÓ 2.5 – CODI NUMÈRIC D'UNA REGLA..... | 45 |
| EXPRESSIÓ 2.6 – VELOCITAT (MODEL NA-SCH) | 51 |
| EXPRESSIÓ 3.1 – ESTAT D'UNA CEL·LA | 56 |
| EXPRESSIÓ 3.2 – CONJUNT D'ESTATS DE L'AC..... | 56 |
| EXPRESSIÓ 3.3 – VEÏNATGE D'UNA CEL·LA | 57 |
| EXPRESSIÓ 3.4 – VEÏNATGE D'UNA CEL·LA (2) | 57 |
| EXPRESSIÓ 3.5 – REGLA D'EVOLUCIÓ 1..... | 62 |
| EXPRESSIÓ 3.6 – REGLA D'EVOLUCIÓ 2..... | 62 |
| EXPRESSIÓ 3.7 – REGLA D'EVOLUCIÓ 3..... | 63 |
| EXPRESSIÓ 3.8 – SEGONA LLEI DE NEWTON | 64 |
| EXPRESSIÓ 3.9 – MASSA D'UN BLOC DE NEU | 64 |
| EXPRESSIÓ 3.10 – FORÇA IMPULSORA | 64 |
| EXPRESSIÓ 3.11 – FORÇA NORMAL | 65 |
| EXPRESSIÓ 3.12 – FORÇA DE RESISTÈNCIA PER FREGAMENT AMB EL SÒL..... | 65 |
| EXPRESSIÓ 3.13 – FORÇA DE RESISTÈNCIA INTERNA..... | 66 |
| EXPRESSIÓ 3.14 – FORÇA DE RESISTÈNCIA PER IMPACTE AMB 1 OBSTACLE..... | 66 |
| EXPRESSIÓ 3.15 – FORÇA DE RESISTÈNCIA PER IMPACTE AMB N OBSTACLES | 66 |
| EXPRESSIÓ 3.16 – FORÇA TOTAL EN UN INSTANT I..... | 66 |
| EXPRESSIÓ 3.16 – FORÇA TOTAL ACUMULADA..... | 67 |
| EXPRESSIÓ 3.17 – CANVI DE TRAJECTÒRIA CAP A L'ESQUERRA | 67 |
| EXPRESSIÓ 3.18 – CANVI DE TRAJECTÒRIA CAP A LA DRETA..... | 67 |
| EXPRESSIÓ 3.19 – PÈRDUA DE MASSA DE NEU | 68 |
| EXPRESSIÓ 6.1 – FASE DE PROPAGACIÓ | 123 |
| EXPRESSIÓ 6.2 – CANVI DE TRAJECTÒRIA CAP A L'ESQUERRA | 126 |
| EXPRESSIÓ 6.3 – CANVI DE TRAJECTÒRIA CAP A LA DRETA | 126 |
| EXPRESSIÓ 6.4 – FORÇA IMPULSORA | 127 |
| EXPRESSIÓ 6.5 – FORÇA DE RESISTÈNCIA PER FREGAMENT..... | 127 |
| EXPRESSIÓ 6.6 – FORÇA DE RESISTÈNCIA INTERNA..... | 128 |
| EXPRESSIÓ 6.7 – FORÇA DE RESISTÈNCIA OFERTA PER 1 OBSTACLE | 128 |
| EXPRESSIÓ 6.8 – FORÇA DE RESISTÈNCIA OFERTA PER N OBSTACLES..... | 128 |
| EXPRESSIÓ 6.9 – FORÇA DE DESPLAÇAMENT | 128 |
| EXPRESSIÓ 6.10 – FORÇA DE DESPLAÇAMENT ACUMULADA EN L'INSTANT I..... | 128 |
| EXPRESSIÓ 6.11 – PÈRDUA DE MASSA DE NEU | 129 |
| EXPRESSIÓ 6.12 – IMPACTE SOBRE UN OBSTACLE..... | 129 |
| EXPRESSIÓ 6.13 – FASE DE MODIFICACIÓ | 130 |
| EXPRESSIÓ 6.14 – COTA ALTA I BAIXA DE L'ALLAU | 132 |
| EXPRESSIÓ 6.15 – DISTÀNCIA MÀXIMA RECORREGUDA | 132 |
| EXPRESSIÓ 6.16 – MÀXIM DESNIVELL..... | 133 |
| EXPRESSIÓ 6.17 – PENDENTS MÀXIM I MÍNIM..... | 133 |

| | |
|---|-----|
| EXPRESSIÓ 6.18 – ANGLE D’UN PENDENT..... | 133 |
| EXPRESSIÓ 6.19 – GRUIX MIG DE NEU TRANSPORTADA | 133 |
| EXPRESSIÓ 6.20 – MASSA TRANSPORTADA | 133 |
| EXPRESSIÓ 6.21 – VELOCITAT MÀXIMA | 134 |
| EXPRESSIÓ 6.22 – COLORACIÓ D’UNA CEL·LA AMB CONTINGUT DE NEU O GEL | 141 |
| EXPRESSIÓ 6.23 – COLORACIÓ D’UNA CEL·LA SENSE CONTINGUT DE NEU O GEL | 142 |
| EXPRESSIÓ 6.24 – COLORACIÓ D’UNA CEL·LA AMB CONTINGUT DE NEU DE PLACA. | 142 |
| EXPRESSIÓ 6.25 – COLORACIÓ D’UNA CEL·LA DE TRENCAMENT | 144 |
| EXPRESSIÓ 6.26 – COLORACIÓ DE LES CEL·LES INVOLUCRADES EN L’ALLAU..... | 144 |

10.4. Referències

10.4.1. Bibliografia

- [1] González de Vallejo, Luís I. *Ingeniería Geológica*. Ed. Prentice Hall. Madrid, 2002.
- [2] Tipler, Paul A. *Física para la Ciencia y la Tecnología – Volumen 1: Mecánica, Oscilaciones y Ondas, Termodinámica*. Traduït per A. Bramon Planas. 5a edició. Ed. Reverté. Barcelona, 2005.
- [3] Fonseca, Pau; Casanovas, Josep; *Simplifying GIS Data Use Inside Discrete Event Simulation Model Through M:N-Ac Cellular Automaton*. Proceedings of Enviromental modelling & simulation. Barcelona, 2005.
- [4] Fonseca, Pau; Casanovas, Josep; Montero, Jordi. *A Cellular Automata and Intelligent Agents Use to Model Natural Disasters with Discrete Simulation*. L. Ubertini, 2004, p.96-101.
- [5] Muñoz Castaño, José Daniel; *Autómatas Celulares y Física Digital*. Santafé de Bogotá, D. C.: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1996. 28 p. ISBN 958-9205-17-8.
- [6] Toffoli, Tommaso; Margolus, Norman; *Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*. The MIT Press, Cambridge MA, 1987.
- [7] Gonzalez Vargas, Luis Fernando. *Una introducción a los Autómatas Celulares*. 1999.
- [8] Mears, Art; *Avalanche Dynamics*.
- [9] Lang, T.E.; Brown R.L. *On Mechanics of the Hard Slab Avalanche*.
- [10] Armstrong, Richard L.; Ives, Jack D. *Avalanche Release and Snow Characteristics*. Institute of Arctic and Alpine Research. University of Colorado. 1976.
- [11] Perla, R.I. *Failure of Snow Slopes*.
- [12] Sommerfeld, R.A. *The Role of Stress concentration in Slab Avalanche Release*. U.S. Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, 1967.

- [13] Atwater, M.M. *Snow Avalanches*. 1954
- [14] Biescas Górriz, Berta; *Aplicación de la sismología al estudio y detección de aludes de nieve*.
- [15] Cáncer Pomar, Luis; *El alud de Peña Gabarda (Balneario de Panticosa, Huesca) del dos de mayo de 2001*. 2002
- [16] Carey, Rikk; Bell, Gavin; Marrin, Chris; *ISO/IEC 14772-1:1997 Virtual Reality Modeling Language (VRML97)*. 1999.
- [17] Liminiana Bernat, Sergio. *Integración de datos SIG en un simulador*. Barcelona, 2006.
- [18] Neifer, Markus. *Porting MFC applications to Linux*. 2002.
- [19] Sankar, Palash. *A Brief History of Cellular Automata*. ACM Computing Surveys, Vol.32, Nº 1. 2002.

10.4.2. Webgrafia

Geosimulation Homepage

<http://www.geosimulation.org>

The GIS Research UK Homepage (GISRUK)

<http://www.geo.ed.ac.uk/gisruk/gisruk.html>

Autómatas Celulares

<http://complex.us.es/~jimenez/CA/ac/node5.html>

Teoría del Autómata Celular

<http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/comun/tesismaestria/rene/tesisReneHtml/node14.html>

Teoría del Campo Promedio en Autómatas Celulares Similares a 'The Game of Life'

<http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/comun/tesismaestria/genaro/thesis.html>

avalanche.org

<http://www.avalanche.org>

Institut Cartogràfic de Catalunya

<http://www.icc.com> -- Institut Cartogràfic de Catalunya

Servei Metereològic de Catalunya

<http://www.meteocat.com/>

Portal Català de Ciències Ambientals

<http://ambientals.iespana.es/>

Los Aludes como riesgo natural y medidas de defensa

<http://www.geocities.com/kalanka/>

Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente

<http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/00General/IndiceGral.html>

Wikipedia - Viquipèdia, L'enciclopèdia lliure

<http://www.wikipedia.org>

Microsoft Developer Network

<http://www.msdn.com>

VRML 1.0/2.0 Specification

<http://www.vrml.org>

Creación de mundos virtuales con VRML 97

<http://dmi.uib.es/~abasolo/cursovrml/indice.htm>

Asignación de Comportamiento Complejo a Mundos Virtuales VRML Utilizando C++

<http://www.revista.unam.mx/vol.2/num2/art2/>

Porting MFC applications to Linux

<http://www-106.ibm.com/developerworks/linux/library/l-mfc/>

Annex 1. Manual d'usuari

INTRODUCCIÓ

El Visor d'allaus és una aplicació que permet l'estudi del fenomen de l'allau mitjançant l'ús d'informació geològica tractada informàticament. L'aplicació incorpora les eines necessàries per tal d'importar dades SIG, representar aquesta informació en un món virtual interactiu en 3 dimensions, simular el fenomen a partir d'un estat inicial i mostrar els resultats d'aquest procés, tant gràficament com numèricament.

INSTAL·LACIÓ

Si la màquina destí no disposa del browser d'VRML CosmoPlayer 2.11: executar el fitxer *CosmoPlayer211.exe*, ubicat en el directori *Aplicacio* del CD, i seguir les instruccions de l'instal·lador.

Executar el fitxer *Visor_Allaus.exe* inclòs en el directori *Aplicacio\Visor_Allaus* del CD i seleccionar el directori destí. Seguir les instruccions fins finalitzar la instal·lació.

REQUISITS MÍNIMS

- Processador Pentium-IV (o equivalent)
- 512MB RAM
- Sistema operatiu Windows 2000/XP
- Browser d'VRML Cosmo Player 2.11 instal·lat

FORMAT DELS FITXERS DE DADES

Els fitxers d'informació geogràfica que accepta l'aplicació han de ser del format Idrisi32 (http://www.geo.hunter.cuny.edu/~mpavlov/Courses/GisSG/W03_1GISFileStructuresLectureDemo.htm).

Per tal de posar en marxa el sistema cal introduir-hi, com a mínim, 3 capes de dades: alçada del terreny, gruix de neu *movible* i tipus de sòl. Opcionalment s'hi poden inserir capes d'obstacles (arbrat de grans dimensions, arbrat de petites dimensions, petites edificacions, murs antiallaus grans i murs antiallaus petits)

Els noms dels fitxers han de seguir una determinada estructura per tal de que aquests siguin acceptats pel sistema. El nom dels fitxers (*.doc i *.img) de la capa d'alçades esdevé el prefix de la resta de fitxers. L'estructura és la següent:

- Alçades: {nom}
- Gruixos: {nom} + "_gruix"
- Tipus de terreny: {nom} + "_terreny"
- Obstacle arbres de grans dimensions: {nom} + "_arbres1"
- Obstacle arbres de petites dimensions: {nom} + "_arbres2"
- Obstacle edificació 100m²: {nom} + "_cases"
- Obstacle mur antiallaus gran: {nom} + "_mur1"
- Obstacle mur antiallaus petit: {nom} + "_mur2"
- Obstacle indeterminat: {nom} + "_altres"

El directori contenidor dels fitxers ha de tenir el mateix nom que els fitxers de la capa de dades d'alçades. *Veure exemples al directori Mapes\ ubicat a l'arrel de l'aplicació.*

Els fitxers de dades de les capes d'alçades i gruixos representaran els valors en metres mitjançant nombres reals.

El fitxer de dades de tipus de sòl contindrà identificadors enters dins del rang 0..8.

0) Neu pols; 1) Neu dura; 2) Gel; 3) Grava grollera; 4) Grava fina; 5) Vegetació suau; 6) Vegetació mitja; 7) Vegetació densa; 8) Aigua

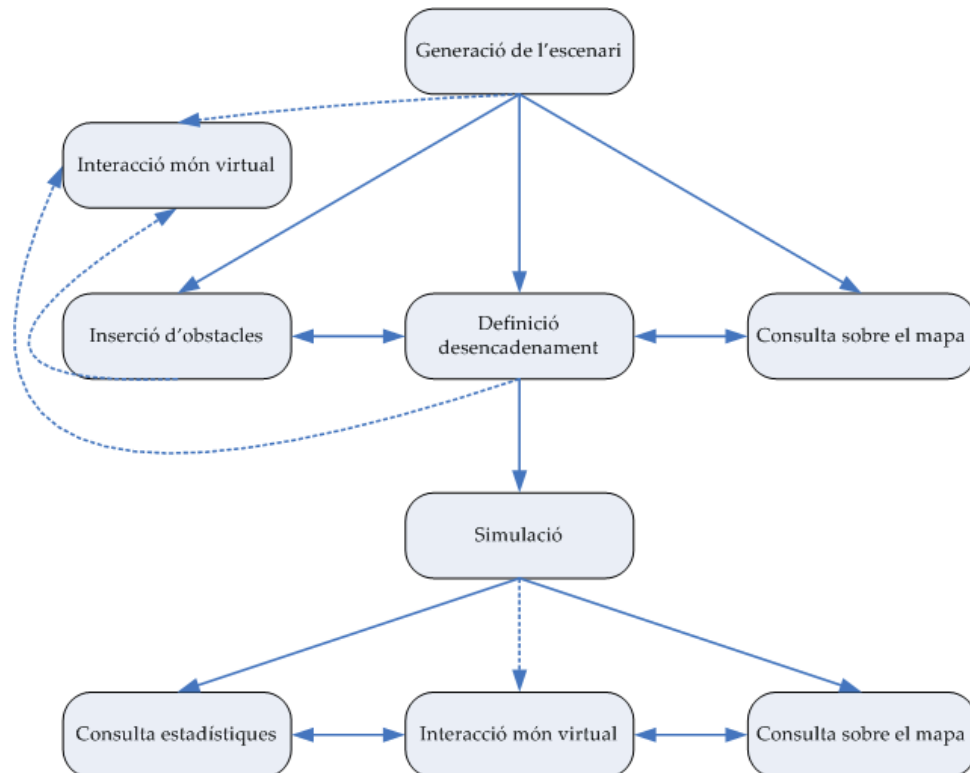
Els fitxers de dades referents a obstacles seran de tipus booleà. 1 indicarà presència de l'obstacle en el punt geogràfic i 0 la no presència.

FINESTRA PRINCIPAL DE L'APLICACIÓ

La finestra principal de l'aplicació consta de dues àrees diferenciades. A la part superior s'ubica l'àrea de funcionalitats per la qual es poden realitzar peticions al sistema mitjançant 7 botons d'acció que donen accés a cadascuna de les funcionalitats. La resta de la finestra l'ocupa el visor de l'escenari on es pot desenvolupar la simulació.



Durant el transcurs del funcionament de l'aplicació les funcionalitats són habilitades seqüencialment. Per arrencar el sistema és necessari inserir-hi les dades d'informació geològica d'una porció de terreny. Per aquesta tasca cal prémer el botó *Carregar terreny*. Finalitzada aquesta operació s'habilitaran les opcions de *Carregar obstacles*, *Definir fractura* i *Consultar cel·la*. Cal finalitzar amb èxit l'operació de *Definir Fractura* per poder iniciar la simulació. Finalitzat aquest procés es podran consultar les estadístiques de l'allau simulada.



Es representa l'escenari en una malla en 3 dimensions, on les columnes es troben en l'eix de les abscises x , les files en l'eix de les ordenades z i el valor de l'alçada de cada cel·la en l'eix vertical y . L'escala d'aquest últim ha estat augmentada per tal de millorar l'apreciació dels pendents del relleu. La proporció amb els altres eixos és de 1/2.5.

El control de representació afegeix en el marge inferior una barra de tasques per a la interacció amb l'escenari. Les accions que es poden realitzar són: zoom, rotar, desplaçar, inclinar, anar i lliscar. A més a més, comptem amb la possibilitat d'afegir força de gravetat sobre el punt de vista, pel que disposarem de dos modes: caminar o volar.

GENERACIÓ DE L'ESCENARI

Per tal de generar l'escenari on es desenvoluparà la simulació cal prémer el primer botó de l'àrea de funcionalitats: *Carregar escenari*. El sistema mostrarà un arbre de directoris per tal de determinar la localització dels fitxers d'informació geogràfica que s'han d'emprar. Seleccionat el directori, cal prémer el botó *Acceptar* per iniciar el procés de generació de l'escenari. Com hem esmentat, en el directori indicat cal que s'hi trobin almenys els fitxers en format Idrisi32 de dades referents a alçades, gruixos i tipus de terreny subjacent i els seus respectius fitxers de documentació per tal de que l'operació tingui èxit. Finalitzada aquesta ja es podrà visualitzar el món virtual interactiu.

INCORPORACIÓ D'OBSTACLES A L'ESCENARI

Generat l'escenari, prement el botó *Carregar obstacles* de la finestra principal, el sistema engegarà una nova finestra que mostrarà els tipus d'obstacle que admet. Es podrà seleccionar qualsevol capa la qual els seus respectius fitxers es trobin en el directori indicat mitjançant l'opció anterior.

Escollides les capes d'obstacles que es desitgen incorporar, es retorna a la finestra principal i s'actualitza la visualització de l'escenari en el món virtual que ara inclourà els objectes seleccionats, si n'hi ha, sobre el relleu de l'escenari.

Nota: Una gran quantitat d'objectes a tractar pot augmentar notablement el temps de procés d'aquesta operació.

DEFINICIÓ DEL TRENCAMENT DE LA PLACA DE NEU

Generat l'escenari, cal definir la localització del desencadenament de l'allau abans d'iniciar el procés de simulació. Aquesta tasca es realitza definint un punt o una línia sobre el mapa introduint les coordenades de les parcel·les de terreny de l'escenari que iniciaran, si es dona el cas, l'allau.

Per accedir a la funcionalitat cal prémer el botó *Definir fractura* de la finestra principal. El sistema mostrarà una nova finestra on apareixeran 6 camps buits. Cadascun d'aquests camps fa referència a una cel·la del mapa a través de les coordenades X (fila) i Y (columna).

| | x | y |
|---|---|---|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |

Aceptar

Cancelar

Màx. X: 150

Màx. Z: 150

Per definir una única parcel·la de desencadenament cal indicar la seva fila i columna i prémer el botó *Acceptar*. No s'accepten coordenades fora de límits. La fila i columna inicial del mapa sempre és 1. A la part inferior dreta de la finestra s'indiquen el nombre de files i de columnes de l'escenari.

Pot definir, a més a més, una línia, introduint les coordenades de les cel·les que formen part d'aquestes (màxim 6). La línia es generarà seqüencialment: de la cel·la 1 a la 2, de la 2 a la 3, etc, i englobarà totes les cel·les que es trobin entre les cel·les indicades.

Quan es realitza l'operació amb èxit es tanca la finestra i s'actualitza el món virtual que mostrarà el punt o línia definit. Les parcel·les implicades en el desencadenament quedaran assenyalades en color vermell. Notis que seleccionar una cel·la que no conté gruix de neu *movible* no té cap efecte.

INICIAR LA SIMULACIÓ

Definit l'escenari i el trencament ja es podrà iniciar el procés de simulació. El temps d'espera per a la seva conclusió variarà segons les dimensions i nivell de detall de l'escenari, així mateix pel nombre d'objectes presents en aquest i la magnitud de la línia de desencadenament.

Finalitzat el procés, s'actualitzarà la representació de l'escenari mostrant l'estat final de la simulació. La zona de desencadenament de l'allau es mostrarà acolorida en vermell, les cel·les que pertanyin al camí de l'allau en taronja i les zones de dipòsit en groc.

CONSULTAR CEL·LA

Generat l'escenari es pot consultar algunes dades referents a les parcel·les del mapa. Prement el botó *Consultar cel·la* de la finestra principal s'engega la següent finestra:

| Informació de cel·la | |
|--|------------|
| X: | 115 |
| Y: | 34 |
| <input type="button" value="Consultar"/> | |
| Alçada | 2928.400 |
| Gruix | 0.000 |
| Tipus de cel·la | Camí |
| Obstacles | Arbre gran |

Mitjançant aquesta finestra podrà consultar la informació de qualsevol cel·la de l'escenari. Només cal indicar les coordenades de la cel·la que es desitja consultar i prémer el botó *Consultar*. La informació que es mostra és la següent: Alçada del relleu, gruix de la neu, estat de la cel·la i la llista dels obstacles que conté (entre parèntesi s'indica el grau d'impacte que ha rebut cadascun, si es dona el cas, per l'allau simulat).

Possibles tipus d'estat d'una cel·la:

- **Fractura:** La cel·la conté (o contenia) neu de placa i forma (o formava) part del desencadenament de l'allau.
- **Dipòsit:** La cel·la conté neu de placa provinent d'una allau.
- **Estàtica:** La cel·la conté neu de placa que no ha participat en una allau.
- **Camí:** La cel·la forma part del camí de l'allau simulat, es a dir, en almenys un pas de la simulació, la cel·la ha contingut massa de neu de placa. És possible que pugui contenir un mínim gruix de neu provinent de les pèrdues de massa de l'allau pel camí.
- **Buida (---):** La cel·la no conté gruix de neu de placa i no forma part del camí.

ESTADÍSTIQUES

Finalitzada la simulació, pressionant el botó 'Estadístiques' es poden consultar les següents dades sobre l'allau:

- 1) **Distància màxima recorreguda:** Distància horitzontal entre el punt de fractura més alt i el punt de dipòsit més baix, mesurat en metres.
- 2) **Desnivell màxim superat:** Distància vertical entre el punt de fractura més alt i el punt de dipòsit més baix, mesurat en metres.

- 3) Pendent màxim: Angle de desnivell màxim que s'ha trobat l'allau en el seu camí.
- 4) Pendent mínim: Angle de desnivell mínim que s'ha trobat l'allau en el seu camí. S'expressen en negatiu els pendents desfavorables a la naturalesa de l'allau.
- 5) Massa transportada: Quantitat de massa total mobilitzada.
- 6) Massa en dipòsit: Quantitat de massa mobilitzada que ha arribat a l'àrea de dipòsit.
- 7) Massa perduda: Quantitat de massa mobilitzada que s'ha quedat en el camí de l'allau.
- 8) Força màxima: Màxima força d'impulsió que ha assolit la massa de neu, o part d'aquesta massa, durant el transcurs del fenomen.
- 9) Acceleració màxima: Màxima acceleració que ha assolit la massa de neu, o part d'aquesta massa, durant el transcurs del fenomen, calculat en m/s^2 .
- 10) N° de passos: Nombre d'iteracions necessàries per concloure la simulació.

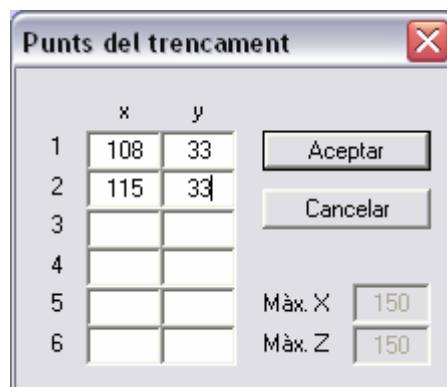
TUTORIAL D'EXEMPLE

- 1.- Accedir a l'opció *Carregar terreny*.
- 2.- Cercar el directori *Mapes* en el directori del programa.
- 3.- Dins del directori *Mapes*, cercar el directori *Aran50* i seleccionar-lo.
- 4.- Prémer *Acceptar*.
- 5.- Interactuar amb el món virtual.
 - Apropar-se al terreny mitjançant el control *Zoom*.
 - Rotar/Inclinar el punt de vista mitjançant el control *Tilt*. Cal prémer el botó *Change Controls* per accedir a aquest control.
 - Canviar de mode (Volar/Caminar) amb els controls *Gravity* i *Float*.

Nota: A gran distància del terreny els controls Rotate i Pan poden actuar de forma extremadament brusca. Els controls recomanats per desplaçar-se per l'escenari són Zoom i Tilt.

Nota: Si el moviment resulta lent, es pot modificar la velocitat a Preferences (part inferior dreta del visualitzador) secció World\Navigation Speed.

- 6.- Accedir a l'opció *Carregar obstacles*.
- 7.- Seleccionar *Arbres grans* i *arbres petits*. Prémer *Acceptar*.
- 8.- Accedir a l'opció *Definir fractura*.
- 9.- Introduir els següents punts de trencament.



A screenshot of a dialog box titled "Punts del trencament" (Break points). It contains a table with 6 rows and 2 columns labeled 'x' and 'y'. The first two rows are filled with the values 108 and 33, and 115 and 33 respectively. To the right of the table are two buttons: "Acceptar" and "Cancel·lar". Below the table, there are two input fields labeled "Màx. X" and "Màx. Z", both containing the value 150.

| | x | y |
|---|-----|----|
| 1 | 108 | 33 |
| 2 | 115 | 33 |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |

Màx. X: 150
Màx. Z: 150

- 10.- Prémer *Acceptar*.
- 11.- Prémer el botó *Iniciar simulació*. Passat uns segons s'actualitzarà el control de visualització mostrant els efectes del procés.
- 12.- Accedir a l'opció *Consultar cel·la*.
- 13.- Consultar la cel·la (110, 34): Es tracta d'una cel·la que ha format part del desencadenament de l'allau. Abans de l'allau aquesta contenia un gruix mig de 0.5m de neu de placa, ara conté tan sols 1,2cm de gruix.

14.- Consultar la cel·la (110, 35). Es tracta d'una cel·la que ha format part del camí de l'allau. Abans de l'allau aquesta no contenia neu de placa, ara conté 0,7cm de gruix mig provinent de les cel·les superiors que han participat en l'allau.

15.- Consultar la cel·la (119, 43). Es tracta d'una cel·la de zona de dipòsit. El gruix mig de la neu dipositada per l'allau és de pràcticament 3 metres. A més a més, conté arbrat de grans dimensions que han rebut un impacte de 0.325 (32,5% de possibilitats de destrucció).

16.- Consultar les estadístiques de l'allau.

